

**Étude Hydrogéologique
des sources bicarbonatées
des bassins tertiaires
de Roanne et de Montbrison**

(Travail du Laboratoire d'Hydrologie Thérapeutique
et de Climatologie)

THÈSE

Pour le doctorat de l'Université de Lyon

SECTION DE PHARMACIE

PRÉSENTÉE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT DEVANT LA

FACULTÉ de MÉDECINE et de PHARMACIE

LE 10 JUILLET 1939

PAR

MARIE-LOUISE FOURNEL

né le 21 mars 1915

à GRENOBLE



PAQUET Imprimeur
10, RUE JARENTE - LYON
1939

**Etude Hydrogéologique
des sources bicarbonatées
des bassins tertiaires
de Roanne et de Montbrison**



Digitized by the Internet Archive
in 2026

**Étude Hydrogéologique
des sources bicarbonatées
des bassins tertiaires
de Roanne et de Montbrison**

(Travail du Laboratoire d'Hydrologie Thérapeutique
et de Climatologie)

THÈSE

Pour le doctorat de l'Université de Lyon

SECTION DE PHARMACIE

PRÉSENTÉE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT DEVANT LA

FACULTÉ de MÉDECINE et de PHARMACIE

LE 10 JUILLET 1939

PAR

MARIE-LOUISE FOURNEL

né le 21 mars 1915

à GRENOBLE



PAQUET Imprimeur
10, RUE JARENTE - LYON
1 9 3 9

PERSONNEL DE LA FACULTE

Doyen honoraire	M. L. HUGOUNENQ
Doyen	M. J. LEPINE.
Assesseur	M. A. MOREL.

PROFESSEURS HONORAIRES

MM. LANNOIS, HUGOUNENQ, PIC, CONDAMIN, PAVIOT,
NICOLAS, VILLARD, NOVE-JOSSERAND, TIXIER, COLLET, GAYET, CLUZET

PROFESSEURS

Cliniques médicales	MM. FROMENT.
Cliniques chirurgicales	SAVY.
Clinique obstétricale et Accouchements.....	PATEL.
Clinique ophtalmologique	BERARD.
Cliniques dermatologique et syphiligraphique.....	VORON.
Clinique neurologique et psychiatrique.....	BONNET.
Clinique médicale infantile.....	FAVRE.
Clinique gynécologique	LEPINE (J.)
Clinique d'oto-rhino-laryngologie	MOURIQUAND.
Clinique urologique	COTTE.
Clinique chirurgicale infantile et orthopédie.....	REBATTU.
Clinique et prophylaxie de la tuberculose.....	CIBERT.
Clinique des maladies infectieuses.....	TAVERNIER.
Physique biologique, Radiologie et Physiothérapie.....	COURMONT.
Chimie biologique et médicale.....	J. CHALIER.
Chimie organique et Toxicologie.....	PONTHUS.
Matière médicale et Botanique.....	FLORENCE
Parasitologie et Histoire naturelle médicale.....	MOREL
Anatomie	MANCEAU.
Histologie	GUIART.
Physiologie	LATARJET.
Pathologie interne	POLICARD.
Pathologie générale et thérapeutique.....	HERMANN.
Anatomie pathologique	CORDIER.
Chirurgie opératoire	CADE.
Médecine expérimentale et comparée et Bactériologie.....	J. F. MARTIN.
Médecine légale	SANTY.
Hygiène	ARLOING (F.).
Pharmacie et Pharmacologie.....	Etienne MARTIN.
Hydrologie thérapeutique et Climatologie.....	ROCHAIX.
	LEULIER.
	PIERY.

PROFESSEURS TITULAIRES SANS CHAIRE

Chargé d'un cours d'Anatomie médico-chirurgicale.....	MM. THEVENOT (Léon)
Chargé d'un cours d'embryologie	NOEL.

AGREGES

MM.	MM.	MM.	MM.
GABRIELLE	GUILLEMINET	DE ROUGEMONT	MORIN
DECHAUME	MORENAS	P. RAVAUULT	BERTRAND
BERNHEIM	REVOL	PIGEAUD	CLAVEL
POLLOSSON	ENSELME	CROIZAT	LEVRAT
CHAMBON	SEDALLIAN	DELORE	
EPARVIER	CREYSSSEL	JOSSERAND	

EXAMINATEURS DE LA THESE

M. PIERY, *Président*,
MM. CORDIER, ENSELME, REVOL

La Faculté de Médecine de Lyon déclare que les opinions émises dans les dissertations qui lui sont présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, et qu'elle n'entend leur donner ni approbation ni improbation.

A MES GRANDS-PARENTS

A MES PARENTS

En gage de reconnaissance infinie et
de profonde affection.

A MES FRERES

A LA MEMOIRE DE MA TANTE

A MES CAMARADES
DE L'INTERNAT EN PHARMACIE

AVANT-PROPOS

Avant d'exposer ici le travail effectué sous la direction de nos maîtres, nous voudrions leur exprimer nos sincères remerciements.

M. le Professeur PIÉRY, professeur d'Hydrologie thérapeutique et de Climatologie, qui nous fait aujourd'hui l'honneur de présider notre thèse, nous a accueillie avec une bienveillance extrême dont nous avons été profondément touchée. Nous le remercions très respectueusement.

Nous ressentons très profondément l'honneur que nous fait M. le Professeur agrégé CORDIER, médecin des Hôpitaux, en acceptant d'être notre juge. Tout en le remerciant de cette marque de bienveillance, nous nous permettons de lui exprimer ici notre très vive admiration.

Nos remerciements iront également à M. le Professeur agrégé REVOL. Il voulut bien nous aider quelquefois de ses conseils au début de nos études. Il nous donne aujourd'hui une nouvelle preuve de sympathie en acceptant de

faire partie de notre Jury. Qu'il nous soit permis de lui exprimer toute notre gratitude.

Enfin nous ne saurions trop remercier M. le Professeur agrégé ENSELME, chargé d'enseignement en chimie biologique et en Hydrologie. C'est à lui que nous devons le sujet de notre étude et ce travail est le sien. Il nous a constamment guidée et n'a épargné ni son temps, ni ses conseils pour rédiger cette thèse dont l'idée directrice lui appartient. Il s'est montré à la fois le maître le meilleur, aux larges vues scientifiques, et le collaborateur au merveilleux allant sachant faire régner autour de lui la plus aimable atmosphère. Nous garderons toujours le souvenir de l'accueil charmant et cordial qu'il nous a réservé et nous nous permettons de lui exprimer notre inaltérable et profonde gratitude.

Nous n'omettons pas de remercier les maîtres bienveillants que nous avons trouvés en les pharmaciens-chefs des Hôpitaux, et en particulier M. le Docteur FOUILLOUZE, pharmacien-chef de l'Hôtel-Dieu, chef de travaux pratiques à la Faculté, qui nous a souvent aidée de ses conseils éclairés.

Les semestres d'internat que nous avons accomplis sous la direction de M. DORCHE, pharmacien-chef à la Croix-Rousse, d'abord, en ensuite sous la direction de M. le Professeur agrégé CHAMBON, pharmacien-chef à l'Hôpital Edouard-Herriot, resteront parmi les moments les meilleurs de nos années d'études. Qu'ils veuillent bien trouver ici l'expression de notre respectueux attachement.

Étude hydrogéologique des sources bicarbonatées des bassins tertiaires de Roanne et de Montbrison

INTRODUCTION

Un grand nombre de sources bicarbonatées se trouvent réunies dans les deux bassins tertiaires de Montbrison et de Roanne. La Loire traverse là deux plaines : celle du Forez et celle du Roannais, dont le sol est formé par des sédiments tertiaires et accessoirement des alluvions qui les recouvrent. Ces deux plaines sont encadrées par des montagnes granitiques ou gneissiques, celle de Roanne est bordée en outre, vers l'est, par une zone de terrains jurassiques qui s'étend entre le tertiaire et le granite. Les deux bassins tertiaires de Montbrison et de Roanne sont séparés par un plateau montagneux, au travers duquel la Loire a ouvert un défilé étroit. Il est formé de terrains carbonifères et de masses porphyriques dont l'éruption remonte à cette époque. En outre, le sol tertiaire de la plaine du Forez a été percé par un grand nombre de cônes de basalte. L'éruption de ce basalte est antérieure au creusement des vallées et date sans doute du pliocène moyen. Ces bassins ont été affectés par des failles récentes qui semblent en général avoir suivi d'anciennes frac-

tures, tous deux offrent une forme dissymétrique et sont tronqués latéralement par des failles limites vers lesquelles incline la pente générale des couches. Il s'ensuit que ces bassins sont formés par des dépôts concentriques s'enfonçant les uns au-dessous des autres.

Dans la plaine du Forez la faille est située sur le bord Est du bassin, on a donc de l'Ouest à l'Est :

1° Des sables et arkoses du Tongrien, ce sont les éléments les plus anciens. Ils forment une longue bande de St-Germain-Laval à St-Marcellin.

2° Des grès et des calcaires aquitaniens qui forment une bande allant de Nervieux à Veauche.

3° Des sables fins aquitaniens qui affleurent à l'Est de Cleppe et au Nord de Montrond. Ils forment une bande discontinue.

4° Un étage de marnes grises entre Feurs et Montrond d'âge indéterminé mais certainement miocène.

Ces quatre étages sont concentriques, le 1^{er} le plus étendu, celui des sables et arkoses, situé à l'Ouest entourant en demi-cercle le second qui entoure à son tour le troisième qui entoure enfin le quatrième.

En outre ces étages s'enfoncent les uns au-dessous des autres, de sorte que si on fait une coupe au niveau du 4^e, à Montrond, par exemple, on est amené à les recouper tous en remontant dans la série jusqu'au premier.

Dans le bassin de Roanne, les choses se passent de la même façon, à cela près que la faille est à l'Est et que les terrains les plus anciens se trouvent par conséquent affleurer à l'Ouest. Ce sont tout d'abord des terrains secondaires qui entourent le tongrien, lequel entoure l'aqui-

tanien. Bien entendu comme dans le bassin précédent le secondaire plonge sous le tongrien qui plonge à son tour sous l'aquitainien.

Dans ces deux plaines de nombreuses sources bicarbonatées sodiques se sont fait jour spontanément ou sont apparues après différents sondages. C'est dans le bassin de Montbrison, les sources minérales de Montrond, Saint-Galmier, Saint-Romain-le-Puy, Sail-sous-Couzan, St Alban, Montbrison, Feurs et dans le bassin de Roanne, les sources de Renaison et St Alban.

L'origine hydrogéologique de ces sources constituera le but de cette étude. Chacune d'elles comporte des eaux riches en acide carbonique, libre ou combiné, et possédant par ailleurs une minéralisation variable.

Les failles, d'une part, les venues basaltiques, d'autre part, constituent, les premières entre leurs plans de contact mal refermés, les secondes à leur surface de contact avec les terrains sédimentaires, des voies de cheminement faciles pour les eaux minérales et pour les gaz venus de la profondeur. La présence d'éléments basaltiques trahissant l'existence de phénomènes volcaniques récents permet de penser qu'une partie de la minéralisation de ces eaux et en particulier l'anhydride carbonique représente des phénomènes volcaniques atténués, à leur dernière phase de manifestation. La richesse en alcalino-terreux des terrains traversés, et en particulier les terrains tertiaires, oblige à admettre une influence de ces terrains sur la minéralisation.

Au total pour expliquer l'hydrogéologie des sources

de ces deux bassins, nous allons être obligés d'envisager les chapitres suivants :

- 1° Le rôle de la minéralisation d'origine profonde.
- 2° Le rôle des terrains granitiques de bordure.
- 3° Le rôle des terrains jurassiques.
- 4° Le rôle des terrains tertiaires.
- 5° Les failles qui permettent le cheminement.
- 6° Les roches éruptives.
- 7° La constitution chimique des eaux.
- 8° Dans un chapitre de synthèse nous essaierons de définir exactement l'origine de ces eaux et de leurs éléments minéraux.
- 9° Enfin nous rapporterons les résultats d'une analyse de boue déposée dans les vasques de la source de Mont rond.

Dans tous les cas, dans le but de réunir les documents qui concernent cette étude, nous rapporterons, d'une part, les données classiques de la géologie de cette région, en citant abondamment les géologues qui les ont décrites, et, d'autre part, les résultats de nos analyses chimiques qui s'efforcent de jeter quelque éclaircissement sur l'origine hydrogéologique de ces eaux.

CHAPITRE PREMIER

ETUDE DES ELEMENTS DES EAUX MINERALES D'ORIGINE PROFONDE

Parmi les éléments dissous dans les eaux minérales, en est un certain nombre qui résultent probablement d'une manifestation volcanique atténuée. On a même assigné à l'eau, dans certains cas, une origine semblable. Pour nous renseigner sur de tels phénomènes, nous avons à notre disposition deux grands moyens : nous pouvons d'une part, étudier les gaz et les vapeurs dégagés pendant ou après une manifestation volcanique, nous pouvons, d'autre part, étudier les gaz et les vapeurs qui se dégagent lorsqu'on chauffe les roches à une température élevée voisine de celle qu'elles peuvent atteindre dans la profondeur d'une faille et d'un cratère. Pour rédiger ce chapitre, nous nous aiderons du beau livre de CLARKE : *The Data of Geochemistry*.

I. Les gaz d'origine volcanique

I. — *Les gaz d'origine volcanique.* Nous allons exposer dans l'ordre chronologique les différentes analyses qui furent faites au niveau des cratères ou à proximité de

ceux-ci, au moment de l'éruption ou dans un temps plus ou moins prolongé après celle-ci. Dans tous les cas, lorsque nous tirerons nos conclusions, nous nous efforcerons de montrer l'analogie qui s'établit entre les différents phénomènes volcaniques lorsqu'on s'écarte de l'éruption soit dans le temps, soit dans l'espace.

1° Vers 1853 Bunsen poursuivit les recherches en Islande, parmi ses analyses on relève les résultats suivants :

D'une fumerole dans le grand cratère de l'Hekla :
 $N^2 = 81,81$ — $O^2 = 14,21$ — $CO^2 = 2,44$ — $H^2S =$ néant
— $SO^2 = 1,54$.

D'une fumerole dans les laves de 1845 de l'Hekla :
 $N^2 = 78,90$ — $O^2 = 20,09$ — $CO^2 = 1,01$.

D'un solfatère de Krisuvik : N^2 1,67 — $H^2 = 4,30$ —
 $CO^2 = 87,43$ — $H^2S = 6,60$.

D'une fumerole à assez longue distance de Krisuvik :
 $N^2 = 0,50$ — $H^2 = 4,72$ — $CO^2 = 79,07$ — $H^2S = 15,71$.

D'un groupe de fumeroles à Reykjalidh, dans l'extrême Nord de l'Islande :

$N^2 = 0,72$ — $H^2 = 25,14$ — $CO^2 = 50,00$ — $H^2S = 24,12$

L'eau condensée de ces fumeroles emporte un peu d'acide chlorhydrique mais en quantité négligeable ; parmi les sublimés Bunsen note des sulfures et des chlorures métalliques variés avec surtout du chlorure de sodium et dans un des sublimés 81,68 % de chlorhydrate d'ammoniaque.

2°) En 1856, SAINTE CLAIRE DEVILLE étudiant les fumeroles développées au Vésuve pendant l'éruption de 1855, donna la description suivante :

a) Fumeroles sèches. Sublimé de chlorure métallique avec traces de sulfate parfois fluorures. Un groupe spécial émet du chlorhydrate d'ammoniaque.

b) Fumeroles acides donnant de la vapeur d'eau mélangée d'acide chlorhydrique et de vapeurs sulfureuses, autour des orifices fumeroliens on a des dépôts de chlorure de fer et de chlorure de cuivre. Ces formations se font dans la lave près de la fissure volcanique, l'acide chlorhydrique domine largement.

c) Fumeroles de vapeur d'eau. Elles contiennent de l'hydrogène sulfuré et des sulfures libres. Leur température excède rarement 80°.

d) Moffettes de vapeur d'eau et d'anhydride carbonique apparaissant au déclin de l'intensité volcanique.

e) Fumeroles émettant seulement de la vapeur d'eau

Cette classification d'ordre décroissant par rapport à l'intensité volcanique donne les grandes lignes des études ultérieures.

3°) En 1858, SAINTE CLAIRE DEVILLE et F. LEBLANC publièrent des analyses de gaz du Vulcano et de l'Etna. Une fumerole dans le cratère du Vésuve donna $\text{HCl} = 86.2$ et $\text{SO}^2 = 13.8$. A Vulcano ils obtinrent des gaz suivants :

A. — Gaz du cratère issu au point de fusion du plomb, dépôt d'acide borique : gaz ramassés sur une fissure émettant des flammes : $\text{SO}^2 = 39.13$ — $\text{O}^2 = 10.10$ — $\text{N}^2 = 50.77$

B. — Gaz semblable au précédent, pas d'acide borique : $\text{SO}^2 = 27.5$ — $\text{O}^2 = 15$ — $\text{N}^2 = 58.48$.

C. — Fumerole sulfureuse du flanc nord du Vulcano : $\text{SO}^2 = 69.6$ — $\text{O}^2 = 5.5$ — $\text{N}^2 = 24.9$

D. — Gaz d'un cratère appelé « Acqua-Bollente », près du bord de la mer, rempli d'eau bouillante : $\text{CO}^2 = 6.4$ — $\text{H}^2\text{S} = 83.1$ — $\text{O}^2 = 7$ — $\text{N}^2 = 9.8$

E. — Gaz d'une dépression suffisamment loin du cratère, remplis d'eau ayant une température de 25° : $\text{CO}^2 = 86$ — $\text{N}^2 = 14$.

A l'Etna ils trouvèrent :

A. — Au lac de Palici : $\text{CO}^2 = 94.7$ — $\text{O}^2 = 1.1$ — $\text{N}^2 = 3.52$ — $\text{CH}^4 = 0.68$.

B. — Les Salines de Paterno : $\text{CO}^2 = 90.7$ — $\text{O}^2 = 1$ — $\text{N}^2 = 20.4$ — $\text{CH}^4 = 5$.

C. — Du Macaluba de Xirbi : $\text{CO}^2 = 0.70$ — $\text{O}^2 = 5.17$ — $\text{N}^2 = 20.4$ — $\text{CH}^4 = 73.73$.

D. — Au Macaluba de Girgenti : $\text{CO}^2 = 1.15$ — $\text{O}^2 = 1,7$ — $\text{N}^2 = 6.75$ — $\text{CH}^4 = 90.4$.

La conclusion de DEVILLE et LEBLANC est la suivante :

La nature des émanations varie avec le temps qui s'est écoulé depuis le début de l'éruption. En un même moment, les diverses fumeroles donnent des émanations qui varient avec leur distance du centre volcanique, dans les deux cas l'ordre de variation est le même.

4°) F. FOUQUE en 1865, étudiant les émanations italiennes s'appliqua à recueillir les gaz de trois fumeroles, dans le cratère de Vulcano. Les fumeroles étaient à des températures différentes.

T — $350^\circ = \text{HCl} + \text{SO}^2 = 73.80$ — $\text{CO}^2 = 23.40$ — $\text{O}^2 = 0.52$ — $\text{N}^2 = 2.28$.

T — $250^\circ = \text{HCl} + \text{SO}^2 = 66.00$ — $\text{CO}^2 = 22.00$ — $\text{O}^2 = 2.20$ — $\text{N}^2 = 9.60$.

T — $150^\circ = \text{HCl} + \text{SO}^2 = 27.19$ — $\text{CO}^2 = 59.62$ — $\text{O}^2 = 2.20$ — $\text{N}^2 = 10.99$.

Dans ces gaz l'acide chlorhydrique prédomine, le SO^2 est peu important, autour de l'orifice on trouve du réalgar, du chlorure ferrique et du chlorhydrate d'ammoniaque.

Un autre groupe de fumeroles, à la température de 100° , donne un dépôt de sulfure avec de temps en temps des additions d'acide borique : l'analyse de leur gaz donne les renseignements suivants :

Première fumerole : $\text{HCL} = 7,3$ — $\text{H}^2\text{S} = 10,7$ — $\text{CO}^2 = 63,8$ — $\text{O}^2 = 2,7$ — $\text{N}^2 = 11,2$.

Deuxième fumerole : $\text{HCL} = \text{Néant}$ — $\text{H}^2\text{S} = \text{Traces}$ — $\text{CO}^2 = 63,59$ — $\text{O}^2 = 7,28$ — $\text{N}^2 = 29,13$.

Une fumerole connue sous le nom d'Acqua-Bollente, qui avait été examinée neuf ans plus tôt par DEVILLE et LEBLANC, montra une diminution du SO^2 remplacé par du CO^2 . L'analyse donna les résultats suivants :

$\text{H}^2\text{S} = 17,55$ — $\text{CO}^2 = 77,02$ — $\text{O}^2 = 0,70$ — $\text{N}^2 = 4,73$.
La température de la fumerole était de 86° .

Enfin des analyses de Fouqué donnent des résultats pour les gaz de deux petites solfatares situées à Pouzole près du Vésuve.

Il obtint les résultats suivants :

T 96° — $\text{H}^2\text{S} = 11,43$ — $\text{CO}^2 = 56,67$ — $\text{O}^2 = 5,72$ — $\text{N}^2 = 26,18$.

T $77,5^\circ$ — $\text{H}^2\text{S} = \text{Néant}$ — $\text{CO}^2 = 15,09$ — $\text{O}^2 = 15,51$ — $\text{N}^2 = 69,40$.

5°) SILVETRI ayant étudié les gaz émis par l'Etna pendant plusieurs éruptions en rapporta les conclusions suivantes sur les différentes fumeroles, conclusions qui ressemblent à celles de DEVILLE et LEBLANC :

a) Les laves fraîches se comportent comme de larges fumeroles et émettent des fumés et des vapeurs. Les gaz

sont en partie condensables donnant un résidu salin et une petite quantité de liquide contenant de l'acide chlorhydrique et de l'acide sulfurique. Les gaz non condensés sont de l'air atmosphérique avec peu d'oxygène. A l'analyse un échantillon donne $O^2 = 18,79$ et $N^2 = 81,21$ %. Le résidu contient du chlorhydrate d'ammoniaque et des carbonates ; des dépôts formés à la surface de la lave ont la composition suivante :

$NaCl = 50,19$ — $KCl = 0,50$ — $Na_2CO_3 = 11,12$ — $Na_2SO_4 = 1,13$ — $H_2O = 30,76$

$NaCl = 63,02$ — $KCl = 0,27$ — $Na_2CO_3 = 6,49$ — $Na_2SO_4 =$ Traces — $H_2O = 30,22$.

$NaCl = 76,01$ — $KCl = 0,03$ — $Na_2CO_3 = 2,11$ — $Na_2SO_4 = 0,75$ — $H_2O = 21,10$.

Parfois elles contiennent en plus du chlorure de cuivre qui donne sur les laves, par oxydation, des dépôts d'atacamite et de tenorite.

b) Les fumeroles à base de chlorhydrate d'ammoniaque sont subdivisées en deux classes :

Les fumeroles acides qui se forment surtout vers la portion terminale du mur de lave et émettent de l'acide chlorhydrique. Elles contiennent aussi du chlorure ferrique partiellement condensé, comme tel partiellement oxydé en hématite. Lorsque la température diminue elle développe de l'hydrogène sulfuré et donne des dépôts cristallisés de sulfure.

Les fumeroles alcalines déposant seulement du chlorhydrate d'ammoniaque. Elles apparaissent à des températures plus basses que les précédentes. La portion gazeuse est essentiellement formée par de l'eau à l'état de vapeur et de l'azote à haute dose jusqu'à 84,17 %.

c) Les fumeroles aqueuses de température relativement basse, qui donne de la vapeur d'eau mélangée d'air.

d) Des fumeroles à vapeur d'eau et à anhydride carbonique qui représentent la dernière phase de l'activité volcanique.

6°) WOLF au Cotopaxi fit des observations uniquement qualitatives. Elles confirmèrent les précédentes en montrant un ordre régulier pour les exhalaisons volcaniques ; près du cratère, il ne trouva pas de vapeur d'acide chlorhydrique et pensa à la présence de chlore libre. A une certaine distance de la montagne, il trouva H^2S et occasionnellement SO^2 .

7°) Dans sa belle monographie des éruptions volcaniques du Santorin, FOUQUE étudie les émanations gazeuses qui montrent de l'hydrogène libre et de petites quantités de carbure d'hydrogène. Après la grande éruption de Nea Kamini, une des îles de l'archipel, éruption commencée en janvier 1866, il ramassa vers le mois de mars un certain nombre de gaz qu'il analysa. D'une fumerole en flamme il recueillit de l'hydrogène et de l'oxygène et pensa que dans cette condition l'eau était dissociée. Ordinairement les gaz sont brûlés en arrivant à l'air, mais dans certaines conditions à Santorin, il lui fut permis de les identifier avant toute oxydation. Les résultats sont les suivants :

Gaz volcanique de Santorin

Gaz recueilli à Nea Kamini le 27 mars 1866 à la surface d'une eau sulfureuse fissurée entre Giorgos et Aphroessa à la température de 78° :

$\text{H}_2\text{S} = \text{Traces} - \text{CO}^2 = 36,42 - \text{H}^2 = 29,43 - \text{CH}^4 = 0,86 - \text{O}^2 = 0,32 - \text{N}^2 = 32,97.$

Même fissure à 69° le 25 mars :

$\text{H}_2\text{S} = \text{Traces} - \text{CO}^2 = 50,41 - \text{H}^2 = 16,12 - \text{CH}^4 = 2,95 - \text{O}^2 = 0,20 - \text{N}^2 = 30,32.$

Gaz recueillis le 7 mars près de la terminaison d'une couche incandescente à la surface de la mer :

$\text{CO}^2 = 0,22 - \text{H}^2 = 56,70 - \text{CH}^4 = 0,07 - \text{O}^2 = 21,11 - \text{N}^2 = 21,90.$

Même cas que précédemment mais d'une arrivée différente de vapeur :

$\text{CO}^2 = \text{Néant} - \text{H}^2 = 1,94 - \text{CH}^4 = 1,00 - \text{O}^2 = 24,94 - \text{N}^2 = 72,12.$

Le troisième de ces gaz constituait un mélange détonnant à la flamme et a été recueilli avec soin et son oxygène est bien d'origine volcanique. Peut-être l'eau de mer en se décomposant l'a-t-elle produit.

En mai 1866 des gaz recueillis à Nea Kamini depuis le Santorin avaient la composition suivante :

Gaz du Santorin

Gaz pris en mai 1866 dans une fissure du Nea Kamini, récolté sur l'eau sulfureuse à 56° :

$\text{H}_2\text{S} = \text{Trace} - \text{CO}^2 = 95,37 - \text{O}^2 = 0,49 - \text{N}^2 = 4,14.$

Gaz récolté le 12 mai 1866 au pied du cône Giorgos d'une petite fumerole entourée de cristaux de sulfure à la température de 87° :

$\text{H}_2\text{S} = 0,42 - \text{CO}^2 = 5,88 - \text{O}^2 = 18,99 - \text{N}^2 = 74,71.$

À la température de 122° :

$\text{H}_2\text{S} = 0,90 - \text{CO}^2 = 12,24 - \text{O}^2 = 16,41 - \text{N}^2 = 70,45.$

À la périphérie du champ éruptif :

$\text{CO}^2 = \text{Néant} - \text{O}^2 = 20,62 - \text{N}^2 = 79,38.$

Gaz récoltes très loin :

$\text{CO}^2 = 56,63 - \text{O}^2 = 1,84 - \text{N}^2 = 41,41 - \text{CH}^4 = 0,12.$

Tout montre une similitude d'évolution avec les volcans italiens. L'anhydride carbonique apparaît lorsque l'intensité volcanique diminue ; au contraire l'hydrogène caractérise le maximum d'intensité, malheureusement les acides produits ont été mal étudiés.

10°) Il faut encore signaler trois analyses de MOISSAN sur des gaz provenant de fumeroles de l'Ouest Indien spécialement intéressantes car elles comportent la présence de l'argon.

D'une fumerole du Mont Pelé à la Martinique, gaz recueillis par Lacroix après la grande éruption de mai 1902. Ces gaz étaient d'abord saturés par de la vapeur d'eau. Tout autour de leur orifice de sortie se condensaient le chlorhydrate d'ammoniaque et des sulfures :

$\text{CO}_2 = 15,38$ — $\text{CO} = 1,60$ — $\text{CH}_4 = \text{Néant}$ — $\text{H}_2 = 8,12$
— $\text{O}_2 = 13,67$. — $\text{N}_2 = 54,94$ — $\text{A} = 0,71$ — $\text{HCl} = \text{Traces}$
— S vapeur = Traces.

D'une fumerole au nord de la Guadeloupe :

$\text{CO}_2 = 52,8$ — $\text{CO} = \text{Néant}$ — $\text{CH}_4 = \text{Néant}$ — $\text{O}_2 = 7,5$
— $\text{N}_2 = 36,07$ — $\text{A} = 0,73$ — $\text{HCl} = \text{Traces}$ — $\text{H}_2\text{S} = 2,17$
— S vapeur = traces.

De la Fumerole Napoléon à la Guadeloupe :

$\text{CO}_2 = 69,5$ — $\text{CO} = \text{Néant}$ — $\text{CH}_4 = \text{Néant}$ — $\text{O}_2 = 2,7$
 $\text{N}_2 = 22,32$ — $\text{A} = 0,68$ — $\text{HCl} = \text{Néant}$ — $\text{H}_2\text{S} = 4,5$ —
 S vapeur = traces.

On voit que l'oxyde de carbone apparaît dans ces émanations du Mont Pelée.

11°) W. LIBBEY au Kilauea montra par une analyse spectroscopique que les flammes volcaniques contiennent de l'hydrogène, de l'oxyde de carbone et des carbures d'hydrogène.

12° JANSSEN observait lui aussi de l'hydrogène en 1867 à Santorin et en 1883 à Kilauea. Il montra aussi la présence des lignes du sodium du cuivre, des chlorures et du carbone.

13° Un travail fondamental sur le Kilauea fut fait par DAY et SHEPHERD qui restèrent plusieurs mois sur le volcan pendant l'année 1912. Non seulement ils déterminèrent directement la température des laves molles, mais aussi ils ramassèrent des gaz volcaniques directement depuis un cône actif au moyen d'un tube de fer qui passait à travers les laves en fusion pour se rendre au cône et au moyen duquel on pompait les gaz. Dans le tube au début 300 cm.³ d'eau furent ramassés en un quart d'heure, cette eau et les gaz dégagés furent ensuite analysés. L'eau contenait différentes substances salines avec des fluorures, des chlorures et des sulfites. Les gaz avaient la composition suivante :

$\text{CO}_2 = 23,8$ — $\text{CO} = 5,6$ — $\text{H}_2 = 7,2$ — $\text{N}_2 = 63,3$ —
 $\text{SO}_2 = \text{Néant.}$

$\text{CO}_2 = 58,0$ — $\text{CO} = 3,9$ — $\text{H}_2 = 6,7$ — $\text{N}_2 = 29,8$
— $\text{SO}_2 = 1,5.$

$\text{CO}_2 = 62,3$ — $\text{CO} = 3,5$ — $\text{H}_2 = 7,5$ — $\text{N}_2 = 13,8$
— $\text{SO}_2 = 12,8.$

$\text{CO}_2 = 59,2$ — $\text{CO} = 4,6$ — $\text{H}_2 = 7,0$ — $\text{N}_2 = 29,2$
— $\text{SO}_2 = \text{Néant.}$

$\text{CO}_2 = 73,9$ — $\text{CO} = 4,0$ — $\text{H}_2 = 10,2$ — $\text{N}_2 = 11,8$
— $\text{SO}_2 = \text{Néant.}$

On ne trouva pas de chlore dans ces gaz ni d'argon, ce dernier fait prouvant qu'il n'y avait pas eu d'admission d'air atmosphérique. L'abondance de l'eau était par ailleurs nettement prouvée.

II. Les gaz occlus dans les roches

On sait depuis longtemps qu'à peu près toutes les roches chauffées au rouge dégagent de grandes quantités de gaz. Ce fait a été noté pour la première fois par PRIETLEY en 1781. Depuis quelques années, ces gaz ont été soigneusement étudiés. On s'aperçut alors que les gaz dégagés constituent un mélange de gaz occlus dans les roches et aussi de gaz engendrés par l'ignition des roches. Voici d'abord quelques documents recueillis sur ce sujet :

1°) Plusieurs auteurs et spécialement HARTLEY, HAWES, WRIGHT, ont montré que le quartz et un certain nombre d'autres minéraux contiennent de petites cavités renfermant l'anhydride carbonique. HAWES et WRIGHT étudièrent spécialement à ce point de vue le quartz enfumé de Branchville dans le Connecticut qui contient une telle quantité d'inclusions gazeuses qu'il peut exploser à la percussion. Dans ce cas le gaz qui n'est pas produit par la chaleur a donné à une analyse de WRIGHT 98,33 % de CO_2 et 1,67 % d'azote, des traces d' H_2S , de SO_2 , de F et de Cl. Un peu d'eau était aussi présente dans les inclusions gazeuses. Dans d'autres minéraux, on trouve parfois d'autres gaz en quantité notable, c'est par exemple l'hydrogène sulfuré dans la calcite canadienne (HARRINGTON) et de l'oxygène que Bunsen put extraire des roches salées de Wieleczka. Dans ce dernier cas, les gaz inclus contenaient 84,6 % de méthane, 10,35 % d'azote et de petites quantités d'oxygène et d'anhydride carbonique. Ces minéraux cependant ne sont pas d'origine volcanique. Les observations de RAMSAY et TRAVERS sont aussi très intéressantes.

tes. Dans le zircon ces auteurs trouvèrent à la fois de l'argon et de l'hélium. Ce dernier gaz fut trouvé dans un assez grand nombre de terres rares et d'uraninite provenant d'une veine de pegmatite.

2^o) En 1876 au cours de ses investigations sur des gaz provenant de météorites, WRIGHT trouva qu'un spécimen chauffé au rouge donnait naissance à 34 fois son volume de gaz qui, outre 13 % de CO², contenait essentiellement de l'hydrogène

3^o) En 1896 TILDEN fit une observation semblable sur le granite rouge de Peterhead. Cette roche donna naissance à 2,6 fois son volume de gaz contenant 24,8 % de CO² et 75,2 % d'hydrogène.

Un an après il publia ces résultats provenant de l'analyse d'un nombre considérable de roches volcaniques et de minéraux. Ces résultats sont les suivants :

Granite : Volume du gaz = 2,8 — CO² = 23,60 — CO = 6,45 — CH⁴ = 3,02 — N² = 5,13 — H² = 61,68.

Gabbro : Volume du gaz = 6,4 — CO² = 5,50 — CO = 2,16 — CH⁴ = 2,03 — N² = 1,90 — H² = 88,42.

Gneiss de Pyroxene : Volume du gaz = 7,3 — CO² = 77,12 — CO = 8,06 — CH⁴ = 0,56 — N² = 1,16 — H² = 12,49.

Gneiss de Corondum : Volume du gaz = 17,8 — CO² = 31,62 — CO = 5,36 — CH⁴ = 0,51 — N² = 0,56 — H² = 61,93.

Basalte : Volume du Gaz = 8,0 — CO² = 32,08 — CO = 20,08 — CH⁴ = 10,00 — N² = 1,61 — H² = 36,15.
CO² = 23,8 — CO = 5,6 — H² = 7,2 — N² 63,3
SO² = Néant.

Même un minéral tel que le beryl donna naissance à 6,7 fois son volume de gaz dans lequel l'hydrogène fut largement prédominant.

4°) En 1898 TRAVERS décrivit une série d'expériences portant sur l'extraction des gaz de divers minéraux et de diverses roches. Elles lui donnèrent des résultats ressemblant à ceux obtenus par TILDEN. La conclusion qu'il en tira fut cependant légèrement différente car TRAVERS fut capable de montrer que dans quelques cas au moins les gaz n'avait pas été occlus mais était le résultat des interactions de substances non gazeuses. La chlorite, les serpentines, le gabbro, le mica, le talc, le feldspath et les glauconies furent étudiées et dans chaque cas l'hydrogène et l'oxyde de carbone qui s'échappèrent du minéral en chauffant dans le vide fut rapporté quantitativement à l'oxyde de fer et l'eau contenus dans chaque spécimen. L'auteur inférait que chacun de ces cas était engendré par une réaction entre les sels de fer, l'anhydride carbonique et l'eau des silicates. Malheureusement les conclusions de TRAVERS ne purent pas être appliquées directement au travail de TILDEN car ce dernier ne donna jamais l'analyse des roches elles-mêmes. Il est cependant notable que les grosses doses de gaz citées par TILDEN avaient été fournies par le gneiss corondum de Seringapatam et non par le gneiss à pyroxène et le basalte qui sont cependant plus riches en composés ferrugineux. Les gaz dégagés par le béryl furent eux aussi considérables. fait que l'hypothèse de TRAVERS ne peut pas expliquer.

5°) SAINTE CLAIRE DEVILLE et TROOST montrèrent que le magma vitreux absorbe des gaz combustibles et probablement de l'hydrogène ; en se refroidissant le verre élimine ces gaz qui forment dans son épaisseur des bulles. Les verres solides à 200° et sous pression de 200 atmos-

phères absorbent de l'oxygène et du CO^2 (HANEAY). Quand le verre est alors refroidi sous pression, les gaz sont retenus, mais lorsque ensuite les verres sont chauffés jusqu'au voisinage du point de fusion, les gaz sont rejetés avec violence, réduisant le verre en morceaux.

6°) Les investigations de A. Gautier vers 1900 donnèrent les mêmes conclusions que les recherches de TRAVERS, mais le travail reçut une plus grande extension et des méthodes d'expériences plus variées furent employées. Deux échantillons d'un même granite ramassés à deux moments différents et chauffés à 100° dans le vide avec de l'acide phosphorique sirupeux donnèrent naissance aux gaz suivants rapportés en cm^3 par kilogramme de roches :

HCl et SiF^4 = Traces — H^2S = 1,33 — CO^2 = 272,6 —
Hydrocarbène = 12,3 — H^2 = 12,3 — N^2 (riche en argon) = 12,2.

HCl et SiF^4 = Traces — H^2S = 22,7 — CO^2 = 237,5 —
Hydrocarbène = 5,3 — H^2 = 191,48 — N^2 (riche en argon) = 102,48.

En chauffant la même roche à 300° avec de l'eau, on obtint les gaz suivants :

H^2S = 1,3 — CO^2 = 7,2 — H^2 = 46,0 — N^2 = 0,3.

H^2S = 1,0 — CO^2 = 14,6 — N^2 = 5,9.

Ainsi il est clair que l'action isolée de l'eau sur une roche ignée modérément chauffée tend à développer des gaz assez semblables à ceux qui sont émis par une activité volcanique. Chauffés au rouge dans le vide des poudres de roches émettent une quantité plus grande de gaz et les phénomènes volcaniques sont encore plus complète-

ment imités. Dans la table ci-jointe on trouve le résultat de divers développements de gaz produits en chauffant au rouge des poudres de roches.

Granite de Vire : $\text{CO}^2 = 14,80$ — $\text{H}^2\text{S} = \text{Traces}$ — $\text{CO} = 4,93$ — $\text{CH}^4 = 2,24$ — $\text{H}^2 = 77,30$ — N^2 (avec argon) = 0,83.

$\text{CO}^2 = 8,98$ — $\text{H}^2\text{S} = 1,71$ — $\text{CO} = 5,12$ — $\text{CH}^4 = 1,09$ — $\text{H}^2 = 82,80$ — N^2 (avec argon) = 0,42.

$\text{CO}^2 = 14,42$ — $\text{H}^2\text{S} = 0,69$ — $\text{CO} = 5,50$ — $\text{CH}^4 = 1,99$ — $\text{H}^2 = 76,80$ — N^2 (avec argon) = 0,40.

Porphyre granitoïde : $\text{CO}^2 = 59,25$ — $\text{H}^2\text{S} = \text{Néant}$ — $\text{CO} = 4,20$ — $\text{CH}^4 = 2,53$ — $\text{H}^2 = 31,09$ — N^2 (avec argon) = 2,10.

Ophite : $\text{CO}^2 = 35,71$ — $\text{H}^2\text{S} = 0,45$ — $\text{CQ} = 4,85$ — $\text{CH}^4 = 1,99$ — $\text{H}^2 = 56,29$ — N^2 (avec argon) = 0,68.

Lherzolite : $\text{CO}^2 = 78,35$ — $\text{H}^2\text{S} = 1185$ — $\text{CO} = 1,99$ — $\text{CH}^4 = 0,01$ — $\text{H}^2 = 7,34$ — N^2 (avec argon) = Traces.

Les pourcentages sont donnés par volume et le volume du gaz réduit à 0° et 760 millimètres est fourni pour un kilogramme de roches.

Avant de les chauffer les roches furent séchées à 250/300° pour enlever l'humidité hygroscopique. Le volume des gaz extraits d'un volume de roche représente 6,7 pour le granite, 7,6 pour les porphyres et 7,6 pour les ophites, 15,7 pour les lherzolites. Le granite on le voit donne les plus petites doses de gaz par volume, mais il est le plus riche en hydrogène. D'après ces calculs Gautier estime qu'un décimètre cube de granite à 1000° peut donner, calculé pour cette température, à peu près 20 lit. de gaz mélangés et 89 litres de vapeur, plus de 100 fois son volume initial.

Dans le but de montrer qu'il ne s'agit pas seulement de gaz inclus dans les roches. Gautier pratiqua plusieurs expériences. Tout d'abord, pensant que les gaz, s'ils sont inclus, auront la même composition pendant tout le temps de leur dégagement, il étudia les gaz apparus pendant le premier tiers et pendant les deux derniers tiers du temps de dégagement. Il trouva :

Premier tiers : $\text{CO}^2 = 20,19$ — $\text{H}^2\text{S} = 1,28$ — $\text{CO} = 0,57$ — $\text{CH}^4 = 2,04$ — $\text{H}^2 = 75,54$ — $\text{N}^2 = 0,30$.

Deuxième tiers : $\text{CO}^2 = 6,13$ — $\text{H}^2\text{S} = 0,41$ — $\text{CO} = 1,02$ — $\text{CH}^4 = 0,80$ — $\text{H}^2 = 91,64$ — $\text{N}^2 = 0,30$.

Une variation semblable fut trouvée au cours de l'évolution des gaz de l'Ophite.

Dans son troisième mémoire, Gautier montra que les silicates ferreux chauffés au rouge, dans un courant de vapeur, libèrent un gaz donnant 65 % d'hydrogène. Cependant l'eau de constitution d'une roche, agissant sur les composés du fer qu'elle contient, peut donner la même réaction. Pour affirmer cette conclusion, Gautier chauffa 150 grammes de poudre d'ophite sèche au rouge et obtint 2 grammes 25 d'eau et 371 cm.³ de gaz contenant 202 cm.³ d'hydrogène et 122 cm.³ d'anhydride carbonique. Lorsque l'évolution des gaz a cessé, le matériel est refroidi puis chauffé dans un courant de vapeur contenant des traces d'anhydride carbonique, on obtient de nouveau 70 cm.³ de gaz qui après que l'on a enlevé l'anhydride carbonique ont la composition suivante :

$\text{CO} = 3,32$ — $\text{CH}^4 = 6,08$ — $\text{H}^2 = 36,20$ — N^2 etc. = 54,20.

Ces gaz ne préexisteraient certainement pas dans la roche, il auraient été d'abord en levés et d'autre part ils étaient modérément riches en oxygène.

Ces conclusions de Gautier furent confirmées par Hüttnér qui, lui aussi, trouva que les gaz en question sont engendrés au moment où l'on chauffe la roche, mais au lieu de regarder l'oxyde de carbone comme dérivé seulement de l'action des silicates ferreux sur l'anhydride carbonique, il montra qu'il pouvait être produit par l'action réductrice de l'hydrogène libérée par le CO^2 .

Gautier, dans une dernière étude montra que la réaction de l'hydrogène sur l'anhydride carbonique était reversible. Au rouge blanc, la réaction est la suivante :



A une température de 1200 à 1250° la réaction devient :



Dans une autre série d'expériences, Gautier trouva que l'hydrogène, a haute température, réduit l'oxyde de carbone formant l'anhydride carbonique, de l'eau et soit du carbone libre, soit du métal. Entre 900 et 1000° la réaction semble être :



Ces réactions semblent contradictoires mais elles dépendent des conditions variables de température et de concentration. Par elles la coexistence de vapeur d'eau, d'hydrogène et d'oxyde de carbone dans les émanations volcaniques devient intelligible. Quand l'eau émise par les

roches chauffées se mélange avec l'anhydride carbonique, d'une autre source, dans le cratère d'un volcan, une quelconque de ces réactions peut se réaliser et des mélanges de gaz, qui parfois contiennent des traces d'acide formiques, sont engendrés. Le mélange est un agent profondément réducteur qui agit sur les silicates de fer dans une direction opposée à celle de la vapeur d'eau qui est oxydante. Ainsi l'oxydation ou la réduction sont possibles selon que les gaz volcaniques ont l'une ou l'autre de ces constitutions.

Allant plus loin encore, Gautier étudia les réactions qui se produisent entre la vapeur d'eau et les sulfures métalliques. La vapeur d'eau, aux très hautes températures change le sulfure de fer FeS , en magnétite Fe_3O_4 avec formation d'hydrogène libre et d'hydrogène sulfuré. La galène, dans un courant de vapeur d'eau surchauffée, est partiellement sublimée et recristallisée comme telle et partiellement décomposée en plomb métallique et soufre libre. Un peu de sulfate de plomb se forme de temps en temps.

Avec le sulfure de cuivre, dans les mêmes conditions, du cuivre est libéré et un mélange d'hydrogène et de SO_2 est formé ; les mêmes mélanges gazeux sont encore engendrés par action de la vapeur d'eau sur l'hydrogène sulfuré. De ces faits, Gautier conclut que le SO_2 des volcans est produit par la réduction du sulfure, suivie par l'oxydation de l'hydrogène sulfuré ainsi libéré. Cette oxydation peut, ainsi que Gautier l'a montré, être réalisée par une réaction entre les oxydes métalliques et l'hydrogène sulfuré. Au rouge, un courant de vapeur d'eau réduit

les sulfures ferreux formant de la magnétite. Au rouge blanc, l'hydrogène sulfuré reconvertit la magnétite en sulfure de fer et engendre un mélange d'hydrogène et de SO^2 . L'hydrogène sulfuré peut aussi réagir sur le CO^2 pour former COS et de l'eau.

Au total, Gautier a montré qu'un très grand nombre de réactions sont possibles entre l'eau, le CO^2 et les constituants solides de la lave. Beaucoup d'entre elles sont réversibles. Les différents équilibres réalisés expliquent les mélanges gazeux qui apparaissent dans les émanations volcaniques. L'azote des gaz volcaniques est attribué par cet auteur à la présence de nitrite dans les laves. Dans un mémoire plus général Gautier a résumé ses vues sur la chimie du volcanisme. Les phénomènes sont dûs, pense-t-il à une fissuration dans la croûte terrestre par laquelle des masses de roches cristallines tombent dans des régions de haute température. Des gaz se développent selon les réactions qu'il a établies, en immenses quantités et sous d'énormes pressions. Pour illustrer l'ordre de grandeur du phénomène, Gautier montre qu'un kilomètre cube de granite donne naissance à 26.400.000 tonnes d'eau et 5.293.000.000 de mètres cubes d'hydrogène, si on les mesure à la température ordinaire. Cet hydrogène en brûlant donne 4.266.000 tonnes d'eau portant au total l'eau produite à 91.000.000 de tonnes. C'est à peu près ce qui passe dans la Seine à Paris en 12 heures, lorsque celle-ci a son débit moyen. Nous pouvons dès lors comprendre que la vapeur d'eau d'origine volcanique et que les gaz peuvent être fournis par cette seule action, sans être obligés de faire appel à une autre cause, telle qu'une infiltration d'eau de mer. Gautier va d'ailleurs

plus loin dans ses hypothèses ; il suppose que le noyau de la terre est en grande partie formé de fer contenant de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone. Il pense aussi à l'existence de carbures métalliques qui engendreraient CO et des hydrocarbures. Cette théorie des carbures n'est pas entièrement due à Gautier,, elle a été aussi proposée par Moissan, qui attribue l'activité volcanique à l'action de l'eau sur les carbures métalliques, bien que ces derniers composés ne soient pas des produits naturels à la surface de la terre. Silvestri obtient de la paraffine solide et des hydrocarbures liquides depuis les laves de l'Etna. Il semble donc que cette théorie puisse être partiellement vraie.

L'étude la plus complète des gaz dégagés par les roches est due à Chamberlain. Cet auteur rapporte plus de 100 analyses de gaz obtenus depuis des roches, des minéraux et des météorites. Il trouva H^2S , CO^2 , CH^4 , H^2 et N^2 . Les chlorures et leurs composés ne sont pas rapportés. En général c'est l'hydrogène et l'oxyde de carbone qui prédominent. Dans les roches profondes, l'hydrogène et le CO^2 sont à peu près en quantité égale. Dans les roches de surface c'est le CO^2 qui prédomine. Parmi les roches ignées ce sont les plus anciennes qui donnent le plus de gaz. Les laves récentes en donnent moins que les roches archéennes.

Chamberlain discute ces analyses surtout quant à l'origine des gaz. Comme Gautier, il attribue la plus grande portion de ces gaz aux réactions des roches chauffées. Cependant il pense à des productions par occlusions gazeuses : ainsi dans le cas du Béryl, cette roche donne plus

d'hydrogène qu'il ne lui serait possible d'en engendrer, par les réactions des petites quantités d'eau sur le fer qui est contenu dans ce minéral. Des inclusions telles que les bulles de gaz dans le quartz sont regardées par lui comme d'une importance mineure. Malgré cela, l'eau nécessaire à la production d'hydrogène, proviendrait en grande partie du mica des roches profondément situées.

Dans une série de publication Brun a émis des vues qui contrastent entièrement avec celles des auteurs précédents. Pour lui l'eau n'a qu'une importance secondaire dans la production de phénomènes volcaniques ; il s'accorde cependant avec Gautier en pensant que les gaz émis par les laves sont engendrés par des réactions chimiques. Leur source, pense-t-il, sont les nitrites de fer et la silice, les hydrocarbures et certains chloro-silicates tels que le composé $\text{Ca}^2\text{Cl}^2\text{SiO}^3$ qui est préparé artificiellement (on connaît dans la nature des chloro-silicates tels que la sodalite). Les hydrocarbures sont extraits en petite quantité des laves ainsi que Silvestri l'avait fait avant lui. D'une lave du Lipari chauffée entre 800° et 900° , Brun peut obtenir une quantité abondante de chlorhydrate d'ammoniaque, rapidement chauffée à 900° , elle donne de l'hydrogène libre. A la température des volcans la roche émet du chlore et de l'acide chlorhydrique. Les gaz volcaniques observés, selon Brun, proviennent de l'action du magma mou sur le composés prénommés et la température à différents moments, donne lieu au processus suivant :

De 0 à 825° : volatilisation de l'eau.

825° : première évolution des vapeurs chlorhydriques.

847 à 1100° : température des explosions.

1100° : température moyenne des coulées de laves.

Les grandes quantités de vapeur sortant des volcans consistent, selon Brun, en chlorure volatilisé avec peu ou pas de vapeur. Comme preuve de cette affirmation Brun a personnellement étudié le Stromboli, le Vésuve, les volcans de Java, des îles Canaries et le Kilauea. Dans tous les cas, il prétend avoir trouvé les produits volcaniques vitrifiés frais pratiquement anhydre et produisant un sublimé de chlorure d'ammonium lorsqu'ils sont chauffés à des températures modérées. A de très hautes températures, près des points de fusion, les gaz sortent avec explosion et ont une composition différente de celle donnée par les auteurs précédents. Par exemple quatre obsidiennes du Krakatoa donnèrent 498 - 543 - 380 et 435 cm³ de gaz par kilogramme, gaz ayant la composition suivante :

Cl² = 59,64 — HCl = 11,63 — SO² = 7,99 — CO² = 6,73

O² = 0,50 — CO = 4,78 — N² et autres gaz = 8,73.

Cl² = 49,94 — HCl = 15,54 — SO² = 11,61 — CO² = 6,87
— O² = Traces — CO = 5,68 — N² et autres gaz = 10,36.

Cl² = 82,04 — HCl = Néant — SO² = 2,46 — CO² = 8,89 — O² = Néant — N² et autres gaz = 6,61.

Cl² = 63,2 — HCl = Néant — SO² et CO² = 29,8 —
O² = Traces — N² et autres gaz = 7,0.

Les chlorures contenaient un peu de chlorure de soufre et de chlorhydrate d'ammoniaque. D'autres obsidiennes de différents volcans donnèrent les mêmes résultats mais avec une plus grande proportion d'acide chlorhydrique et de

SO² et moins de chlore libre. Dans le but de préciser d'où pouvait provenir l'extraordinaire différence observée entre les dosages de cet auteur et ceux des auteurs précédents, Brun déclara qu'il étudiait un matériel relativement frais, alors que ses prédécesseurs examinaient un vieux matériel (un matériel mort) tel que les granites. Il est difficile de dire quelle est la valeur de cette distinction.

Les publications des recherches de Brun n'allèrent pas sans controverses spécialement entre lui et Gautier. Brun argua que les sublimés volcaniques de chlorures métalliques, tels que les chlorures de magnésium, de fer sont incompatibles avec la présence d'eau dans le magma, car ils sont facilement hydrolysés. Ce à quoi, Gautier répondit qu'une large quantité d'acide chlorhydrique dans les émanations volcaniques, peut inhiber partiellement ou entièrement les hydrolyses habituelles. Brun regarde le magma de la cheminée volcanique comme anhydre. Les gaz des fumeroles sont généralement au contraire hydratés ainsi que le montrent les analyses de Gautier :

Récoltés au Vésuve trois mois après l'éruption de 1906 :

HCl = 0,78 — CO² = 11,03 — CO = Néant — H² = 1,24 — O² = 3,72 — N² A et C = 15,49 — H²O vapeur = 67,74.

HCl = Traces — CO² = 6,68 — CO = Néant — H² = Traces — O² = 6,00 — N²A et C = 24,88 — H²O, vapeur = 62,44.

L'eau dans ces cas peut-être d'origine superficielle.

Prestwich a noté que les sources près des volcans augmentent leur débit avant l'éruption. Une très sérieuse objection peut être faite à l'hypothèse de Brun en invoquant le fait que les roches plutoniques profondément situées qui se solidifient probablement en dehors de toute influence de l'eau contiennent des micas dont l'eau est un des constituants essentiels. On comprend mal aussi la présence de basaltes analcimes, si le magma est réellement anhydre.

Day et Shepherd ont pu recueillir des quantités d'eau considérables des laves molles du Kilauea ; ici le magma n'est donc pas anhydre. Ils notent aussi l'absence de chlorure dans les gaz de ce volcan et les vapeurs blanches ne sont pas constituées par du chlorhydrate d'ammoniacque.

En résumé le travail de Gautier sur la chimie volcanique semble le plus général et le plus satisfaisant. Les roches contiennent en effet des inclusions qui se sont probablement situées au moment de la solidification du magma. De l'eau se forme aussi en chauffant mais il ne faut pas oublier que les expériences de Gautier ne reproduisent pas exactement les conditions réalisées dans les volcans. Ces roches sont chauffées dans des conditions telles que les produits gazeux sont éliminés au fur et à mesure de leur formation. Dans les volcans, au contraire, ils s'accumulent jusqu'au moment de l'explosion. La vapeur d'eau peut oxyder un composé ferreux, mais l'hydrogène qui l'avoiisine a un pouvoir réducteur, au total il s'établit

un équilibre, la chimie qui en résulte est donc beaucoup plus complexes que dans les expériences précitées, c'est celle des hautes températures et des grandes pressions et nous ne pouvons préciser exactement les facteurs qui jouent dans ces phénomènes.

Conclusions du chapitre premier

En manière de conclusions, nous voudrions résumer d'après les données précédentes, les possibilités qu'ont certains gaz, présents dans les eaux minérales, de trouver une origine profonde dans une manifestation volcanique atténuée.

Il n'est pas douteux que l'anhydride carbonique constitue l'élément le plus tardif des manifestations volcaniques. Sa présence dans les eaux minérales, vers les emplacements d'anciens volcans, relève d'une façon évidente d'une origine profonde. Il semble bien qu'à ce point de vue l'accord soit fait entre tous les auteurs.

L'hydrogène sulfuré se trouve évidemment à une distance assez grande des cratères ; cependant il semble bien que, assez vite dans le temps, cette manifestation volcanique s'atténue. Il serait hasardeux de vouloir aujourd'hui attribuer sa présence dans une eau minérale à un phénomène volcanique.

L'acide chlorhydrique s'atténue beaucoup plus rapidement encore. Si l'on se reporte aux chiffres de Fouqué, on voit que pour un abaissement de température de 200°.

c'est-à-dire un écart topographique relativement faible, il passe de 73 % à 27 % dans les gaz dégagés ; c'est donc une hypothèse hardie que de lui considérer une origine profonde possible lorsqu'il s'agit de volcans du type français, c'est-à-dire remontant au moins au pléistocène.

Les sublimés émis par les volcans et qui imprègnent les laves sont en grande partie constitués par des chlorures, cependant on peut se demander si leur masse est telle qu'ils puissent être à l'origine d'une minéralisation telle que celle des sources à gros débit et très anciennes que l'on rencontre dans les stations hydrominérales de notre pays. Il ne faut pas oublier d'autre part que ces sublimés sont la plupart du temps constitués en grande partie par du chlorhydrate d'ammoniaque.

Dans le cas de l'acide chlorhydrique et de l'hydrogène sulfuré, on rencontre constamment en même temps dans les gaz dégagés de l'anhydride carbonique. On peut penser qu'au fur et à mesure que l'on s'écarte du moment de l'éruption, la quantité d'anhydride carbonique ne peut aller qu'en augmentant. Il est donc difficile de conclure à une origine volcanique pour l'hydrogène sulfuré et l'acide chlorhydrique si l'on a pas en même temps une proportion très importante d'anhydride carbonique.

CHAPITRE II

L'ETUDE DU GRANITE

DE LA BORDURE OUEST DU BASSIN DU FOREZ

Nous avons vu que le bassin du Forez est constitué par des terrains tertiaires qui s'interrompent brusquement au niveau d'une faille pour faire suite à l'Est, à des terrains granitiques. L'existence de ces granites dans la profondeur, leur proximité de certaines villes d'eaux telles que St-Galmier, nous obligent à en donner une description chimique. Nous donnerons d'abord, d'après Clarke, la description d'un certain nombre de granites, description chimique qui servira de base de comparaison à notre étude d'un échantillon de granite recueilli à St-Galmier, le plus près possible de la source.

I. Analyse chimique des divers granites

Nous relevons dans CLARKE :

1. Granite de Currant Creak Canyon, Pikes Peak, Colorado (Mathews), contenant : microcline, quartz, muscovite, sericite.

$\text{SiO}_2 = 74,40$ — $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14,43$ — $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,89$ — $\text{FeO} = 0,22$ — $\text{MgO} = 0,07$ — $\text{CaO} = 0,58$ — $\text{Na}_2\text{O} = 1,76$ — $\text{K}_2\text{O} = 6,56$ — $\text{H}_2\text{O} = 0,15$ — $\text{H}_2\text{O}+ = 0,92$ — $\text{TiO}_2 = 0,12$ — $\text{P}_2\text{O}_5 = 0,22$ — $\text{MnO} = \text{Traces}$ — $\text{SrO} = \text{Néant}$ — $\text{Li}_2\text{O} = \text{Traces}$ — $\text{F} = 0,04$.

2. Granite à biotite, Sentinel Point, Pikes Peak, Colorado (Mathews), contenant : microcline, quartz, muscovite, sericite, apatite, zircon, sphene, magnetite.

$\text{SiO}_2 = 77,03$ — $\text{Al}_2\text{O}_3 = 12,00$ — $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,76$ — $\text{FeO} = 0,86$ — $\text{MgO} = 0,04$ — $\text{CaO} = 0,80$ — $\text{Na}_2\text{O} = 3,21$ — $\text{K}_2\text{O} = 4,92$ — $\text{H}_2\text{O} = 0,14$ — $\text{H}_2\text{O}+ = 0,30$ — $\text{TiO}_2 = 0,13$ — $\text{P}_2\text{O}_5 = \text{Traces}$ — $\text{BaO} = \text{Traces}$ — $\text{SrO} = \text{Néant}$ — $\text{Li}_2\text{O} = \text{Traces}$ — $\text{BoO} = \text{Traces}$ — $\text{F} = 0,04$.

3. Granite de Currant Creak Canyon, Pikes Peak Colorado (Mathews), contenant : perthite, microcline, quartz, biotite, muscovite, plagioclase, limonite.

$\text{SiO}_2 = 73,90$ — $\text{Al}_2\text{O}_3 = 13,65$ — $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,28$ — $\text{FeO} = 0,42$ — $\text{MgO} = 0,14$ — $\text{CaO} = 0,23$ — $\text{Na}_2\text{O} = 2,53$ — $\text{K}_2\text{O} = 7,99$ — $\text{H}_2\text{O} = 0,16$ — $\text{H}_2\text{O}+ = 0,33$ — $\text{TiO}_2 = 0,12$ — $\text{P}_2\text{O}_5 = 0,22$ — $\text{MnO} = \text{Traces}$ — $\text{BaO} = \text{Traces}$ — $\text{SrO} = \text{Néant}$ — $\text{Li}_2\text{O} = \text{Traces}$ — $\text{F} = 0,04$.

4. Granite à biotite, Mount Ascutney, Vermont (Daly), contenant : quartz, orthoclase, plagioclase, biotite, magnésite, sphene, apatite, zircon.

$\text{SiO}_2 = 71,90$ — $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14,12$ — $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1,20$ — $\text{FeO} = 0,86$ — $\text{MgO} = 0,33$ — $\text{CaO} = 1,13$ — $\text{Na}_2\text{O} = 4,52$ — $\text{K}_2\text{O} = 4,81$ — $\text{H}_2\text{O} = 0,18$ — $\text{H}_2\text{O}+ = 0,42$ — $\text{TiO}_2 = 0,35$ — $\text{ZrO}_2 = 0,04$ — $\text{CO}_2 = 0,21$ — $\text{PP}_2\text{O}_5 = 0,11$ — $\text{MnO} = 0,05$ — $\text{BaO} = 0,04$ — $\text{F} = 0,06$ — $\text{Cl} = 0,02$ — $\text{FeS}_2 = \text{Traces}$.

5. Granite de Pigeon Point, Minnesota (Bayley), contenant : feldhspathe, quartz, chlorite, muscovite, rutile, ematite, apatite, calcite.

$\text{SiO}^2 = 72,42$ — $\text{Al}^2\text{O}^3 = 13,04$ — $\text{Fe}^2\text{O}^3 = 0,68$ — $\text{FeO} = 2,49$ — $\text{MgO} = 0,58$ — $\text{CaO} = 0,66$ — $\text{Na}^2\text{O} = 3,44$ — $\text{K}^2\text{O} = 4,97$ — H^3O et $\text{H}^2\text{O}+ = 1,21$ — $\text{TiO}^2 = 0,40$ — $\text{P}^2\text{O}^5 = 0,20$ — $\text{MnO} = 0,09$ — $\text{BaO} = 0,15$ — $\text{SrO} =$ Traces — $\text{Li}^2\text{O} =$ Traces — $\text{Cl} =$ Traces.

6. Granite Florissant Colorado (Mathws) contenant : microcline, albite, quartz, biotite.

$\text{SiO}^2 = 75,92$ — $\text{Al}^2\text{O}^3 = 13,12$ — $\text{Fe}^2\text{O}^3 = 0,33$ — $\text{FeO} = 1,40$ — $\text{MgO} =$ Traces — $\text{CaO} = 0,15$ — $\text{Na}^2\text{O} = 4,60$ — $\text{K}^2\text{O} = 4,15$ — $\text{H}^2\text{O} = 0,16$ — $\text{H}^2\text{O}+ = 0,32$ — $\text{TiO}^2 = 0,05$ — $\text{CO}^2 = 0,03$ — $\text{P}^2\text{O}^5 =$ Traces — $\text{NaO} = 0,04$ — $\text{BaO} =$ Traces — $\text{SrO} =$ Néant — $\text{Li}^2\text{O} =$ Traces — $\text{F} = 0,12$.

7. Granite Big Timber Creak, Crazy Mountains, Montana (Wolff), contenant : quartz, orthoclase, olligoclase, biotite.

$\text{SiO}^2 = 74,37$ — $\text{Al}^2\text{O}^3 = 13,12$ — $\text{Fe}^2\text{O}^3 = 0,48$ — $\text{FeO} = 0,87$ — $\text{MgO} = 0,35$ — $\text{CaO} = 1,26$ — $\text{Na}^2\text{O} = 2,98$ — $\text{K}^2\text{O} = 5,18$ — $\text{H}^2\text{O} = 0,15$ — $\text{H}^2\text{O}+ = 0,34$ — $\text{TiO}^2 = 0,07$ — $\text{P}^2\text{O}^5 = 0,03$ — $\text{MnO} =$ Traces — $\text{BaO} = 0,04$ — $\text{SrO} =$ Traces — $\text{Li}^2 =$ Néant.

8. Aplite Yuba Gap, Sierra County, Californie (Turner), contenant : orthoclase, quartz, plagioclase, microcline, mica brun et fer.

$\text{SiO}^2 = 76,03$ — $\text{Al}^2\text{O}^3 = 13,39$ — $\text{Fe}^2\text{O}^3 = 0,48$ — $\text{FeO} = 0,31$ — $\text{MgO} = 0,05$ — $\text{CaO} = 1,28$ — $\text{Na}^2\text{O} = 2,98$ — $\text{K}^2\text{O} = 5,18$ — $\text{H}^2\text{O} = 0,15$ — $\text{H}^2\text{O}+ = 0,34$ — $\text{TiO}^2 = 0,07$ — $\text{P}^2\text{O}^5 = 0,03$ — $\text{MnO} =$ Traces — $\text{BaO} = 0,04$ — $\text{SrO} =$ Traces — $\text{Li}^2\text{O} =$ Néant.

II. Granite de Saint-Galmier

1° ETUDE MICROSCOPIQUE.

Granodiorite à plagioclases mûclés et fortement altérés avec mouchetures de séricite. Biotite presque entièrement épigénisée en chlorite. La roche est traversée par un filon de quartz pigmatitique à extinction doulante lardé de feldspaths siénétisés.

2° ETUDE CHIMIQUE.

SiO ²	63,4 %	CoO	0,124 %
SO ⁴	1,25 %	MgO	Traces
CO ²	0,14 %	K +	3,68 %
Cl	0,72 %	Na +	0,45 %
Al ² O ³	19,82 %	Li	Traces
Fe ² O ³	4,4 %	H ² O	1,10 %

Conclusion du chapitre II

La richesse de cette roche en alumine et fer aux dépens de la silice nous fait penser qu'il s'agit d'un granite de surface, déjà sans doute altéré, bien que, à l'examen direct, ce granite paraisse intact.

Les éléments qu'il paraît pouvoir céder aux eaux sont essentiellement le fer, l'alumine, la silice, le potassium.

CHAPITRE III

LES TERRAINS SECONDAIRES DU BASSIN DE ROANNE

Les terrains secondaires du bassin de Roanne s'enfoncent sans doute sous le bassin tertiaire. Les eaux peuvent le rencontrer lors de leur cheminement profond, aussi en donnerons-nous une rapide description.

Les terrains jurassiques qui affleurent sont ainsi décrits dans la NOTICE de la carte géologique de Roanne :

Le *Bathonien* est représenté en quelques points par des calcaires blancs en plaquettes, que l'on voit au sommet des carrières de calcaires oolithiques (Chandon, Iguerande).

Les calcaires jaunes à entroques du Bajocien forment un banc épais de 50 mètres, exploité partout pour pierre de taille. Les carrières couvrent les deux rives de la Loire, au-dessous de Pouilly.

Le *Lias* est représenté par ses étages moyen et supérieur. Les marnes toarciennes, avec rognons de pyrite et bancs ligniteux, sont rarement visibles : elles forment le sous-sol des prairies au flanc de tous les coteaux de la vallée du Sornin et de ses affluents. Elles fournissent de nombreuses Ammonites (bifrons, radians, insignis, etc.)

On trouve plus bas des marnes à picatules, des calcaires marneux grisâtres, riches en bécimnites (zone de l'*Ammonites margaritatus*).

Enfin, à la base, deux bancs de calcaire : le premier jaune ocreux, à *Gryphoea cymbium*, le second gris, à *Gryphoea obliqua*, exploité pour pierre à chaux. On le retrouve tout le long de la vallée du Sornin et sur les bords de la Loire, entre Pouilly et Vougy, où il est recouvert par des arkoses.

Parfois ce banc passe vers le bas à des grès, généralement peu épais, qu'on exploite à Maizilly et qui sont sans doute un facies littoral du lias (la Raterie, le Bost près Cououvre).

Ailleurs (entre Tancon et Châteauneuf, à Boyer) le lias moyen repose sur le granite, et l'on voit entre les deux une brèche de cailloux granitiques et porphyriques cimentés par du calcaire cristallin.

Tous ces terrains plongent vers la Loire et occupent une zone dont la direction générale est N.-N.-E., mais elle est traversée par de nombreuses failles, et séparée le plus souvent de la région granitique de l'Est par une série de failles orientées N.-S. et E.-O. qui se croisent et se rejettent. Une seconde ligne de faille parallèle à la première fait reparaître le granite à la base des coteaux de Saint-Bonnet-de-Cray, où se retrouve à nouveau toute la série plongeant vers l'Ouest.

Conclusion du chapitre III

Nous retiendrons de cette description la richesse en calcaires de ces terrains. L'intérêt de ce fait du point de vue hydrologique sera discuté ultérieurement.

CHAPITRE IV

LES TERRAINS TERTIAIRES DE LA PLAINE DU FOREZ ET DE LA PLAINE DE ROANNE

Comme nous l'avons vu dans l'introduction, les terrains tertiaires de la plaine de Roanne forment autant de couches concentriques qui s'enfoncent les unes au-dessous des autres, les plus anciennes étant à l'Est dans le bassin de Roanne, à l'Ouest dans le bassin du Forez.

Nous allons étudier séparément ces deux bassins en rapportant les données classiques des géologues et en citant ici leurs principales conclusions. En outre dans la plaine de Montbrison, divers sondages ont été faits. Nous avons pu nous procurer les éléments de l'un d'eux grâce à l'obligeance de M. le Général Boucherie, Président du Conseil d'administration de Montrond, qui voudra bien recevoir nos plus vifs remerciements. Un certain nombre

des échantillons de roches recueillies lors de ces sondages ont pu ainsi être analysés et rapprochés de l'analyse d'échantillons que nous avons recueillis dans les affleurements de surface. Toutes ces données géologiques et chimiques sont réunies dans ce chapitre.

A. Description géologique de la plaine du Forez

Différents auteurs ont fourni de cette plaine une bonne description.

I. D'APRES LE VERRIER

D'après Le Verrier, la description de la plaine du Forez est la suivante :

PREMIER ETAGE. — *Argiles et sables feldspathiques.* — Le premier, qui se montre surtout sur les flancs des monts du Forez, se compose d'argiles et de sables feldspathiques. On peut l'observer à la tranchée des Tourettes, dans le petit vallon situé au Nord de Montbrison et connu sous le nom de Crases de Curcieux ; dans la vallée qui descend de Marcoux, etc... Les cours d'eau y ont creusé des gorges aux flancs escarpés et bizarrement découpés ; la plus remarquable est celle de Curcieux.

On y voit, au milieu du sable feldspathique gris et cohérent, des lits minces de sable fin et d'autres de galets ; ces galets ne sont pas très gros, le granite y domine. Il n'y a pas de basalte. On les distingue facilement du cailloutis plus grossier qui couvre le terrain, et où dominent le quartz et le basalte. Ces lits sont plus inclinés que le thalweg de la gorge, ce qui indique pour la stratification une pente prononcée vers le centre de la plaine.

Les argiles de cet étage sont généralement grasses, parfois réfractaires. Elles sont par places, colorées en rouge brique ; cette coloration ne manque jamais au voisinage des buttes de basalte qui ont percé le terrain tertiaire, et doit s'attribuer à des émanations ferrugineuses qui ont sans

doute commencé avec l'éruption des basaltes, mais qui n'ont pas cessé depuis.

La note dominante de cet étage, comme composition lithologique, est l'abondance du feldspath ou des produits de sa décomposition. Il est analogue aux arkoses de la Limagne et paraît le produit de la désagrégation du granite, presque sur place, ou du moins avec un charriage peu prolongé.

Répartition topographique. — Il forme sur le bord ouest de la plaine une bande bien continue et se termine, du côté Est par une zone argileuse que recouvrent de nombreux étangs. Au Nord et au Sud il est moins visible et masqué par des alluvions ; on peut y rattacher le sous-sol argileux de la forêt de Bas au Nord, du plateau de la Gouyonnière au Sud.

Sur la lisière Est, il semble manquer. Les argiles qu'on retrouve sur le flanc des montagnes de ce côté sont plus maigres et méritent plutôt le nom de terre à pisé. Elles ne sont pas stratifiées ; on y a trouvé des silex taillés, et nous croyons devoir les rapporter toutes aux alluvions quaternaires.

Ainsi cet étage formerait une zone elliptique entourant la plaine de trois côtés, mais interrompue à l'Est.

Age. — Par analogie avec les arkoses de la Limagne et avec celles du Roannais on conclut que cet étage doit être rapporté au Tongrien.

DEUXIÈME ÉTAGE. — *Grès et calcaires.* — A l'intérieur de la zone argileuse que nous venons de signaler et comme formant une seconde ceinture autour du centre de la plaine, se développe une large bande où dominent les grès.

Ils sont composés de grains de quartz dont la grosseur peut varier de celle d'un poids à celle d'une noisette, agglutinés par un ciment argileux. Leur cohésion est toujours assez faible, et ils passent à de véritables sables. Cependant ils forment presque toujours des berges escarpées. En tout cas, ils se distinguent des sables du premier étage par l'abondance du quartz et par la couleur qui est souvent verte dans

les tranchées fraîches ; là où la roche a été altérée par l'air, elle devient rouge, mais avec des nuances pourpres ou violettes qui ne sont pas identiques à celles des argiles dont nous avons parlé plus haut.

C'est donc cet étage, et surtout à sa base, que se rencontrent les lentilles calcaires qui prennent un grand développement près de Sury-le-Comtal. Ce calcaire est toujours un peu siliceux, et en certains points passe insensiblement au grès. Il se recouvre à la surface d'une terre fine, d'un brun rougeâtre foncé, très caractéristique et provenant sans doute de la dissolution du calcaire par les eaux, qui n'ont laissé que les éléments argileux et ferrugineux.

Répartition topographique. — L'étage des grès s'observe très bien sur les berges de la Loire, aux environs de Veauche : il y forme une bande allant de Bouthéon à Cuzieu. La stratification est nettement inclinée du Sud au Nord, soit toujours vers le centre de la plaine. Le calcaire est presque absent ; on observe quelques lits insignifiants au Sud de Veauche et dans les berges des Volons.

Ces lits paraissent avoir été rencontrés un peu plus au Nord-Est, par le sondage de Veauche, à une profondeur de 50 mètres environ. On retrouve aussi un lambeau de calcaire à Saint-Galmier.

On voit des sables quartzeux assez solides dans les petits cours d'eau qui se jettent dans la Loire en aval de cette ville. Ces faits permettent de supposer que la zone en question se prolonge au Nord-Est vers Saint-Galmier et Bellegarde. On retrouve encore un lambeau calcaire derrière le château de Soleillant, mais il paraît isolé des failles. Puis, en continuant vers le Nord, il n'y a plus d'indice de cet étage sur la rive droite de la Loire. On retrouve au point de Balbigny un lambeau calcaire dans les grès. Mais la berge n'est visible que sur une faible étendue.

Sur la rive gauche, au contraire, l'étage se développe régulièrement en demi-cercle. Dans toute la région sud-ouest, il est riche en calcaire et occupe une grande largeur, depuis Sury-le-Comtal jusqu'à Boisset et Grézieux. Dans toute la

vallée de la Mare, les lits semblent bien incliner vers le Nord-Est. Au Nord de Grézieux, le calcaire manque, et l'étage est bien moins caractérisé ; il semble se retrécir. Cependant, on peut y rattacher, selon toute vraisemblance, les sables quartzeux grossiers situés au-dessus de Magneux, les grès qui bordent le Vizézy, à l'Ouest de Poncins, les sables et grès des falaises escarpées de Nervieux et de Mizérieux ; cette bande vient aussi se raccorder au lambeau de Balbigny.

Dans toute cette région la stratification est peu nette ; cependant on observe une pente vers l'Est, dans les falaises de Mizérieux.

Cet étage forme donc une zone elliptique un peu plus complète que la précédente, mais dont un segment manquerait encore vers le Nord-Est, entre Balbigny et Bellegarde.

M. Mayençon a trouvé dans le grès calcaire, près de Saint-Cyprien, les restes d'une tortue mal déterminée et une plaque avec *Cypris faba*, des gastéropodes très déformés parmi lesquels *Potamides Lamarcki*. Il s'agit donc d'un étage appartenant à l'aquitanien.

TROISIÈME ÉTAGE. — *Sables fins*. — Le troisième étage est plus difficile à observer. Il se compose de sables quartzeux très fins, où il ne peut subsister aucune tranchée profonde, et qu'on peut confondre avec les alluvions qui les cachent souvent. Ces sables forment toute la colline de Chambéon ; leur hauteur, leur épaisseur, l'absence de cailloutis et d'éléments basaltiques les distinguent des alluvions et nous engagent à en faire un membre de la formation tertiaire.

On retrouve des sables analogues entre Meyrieu-Montrond et Cuzieu, et sur la Loire, au Nord de Feurs. Nous croyons qu'ils doivent former une troisième zone intérieure et concentrique aux deux premières. Elle est difficile à suivre, mais nous verrons que le sondage de Montrond confirme cette hypothèse.

QUATRIÈME ÉTAGE. — *Marnes grises*. — Le quatrième étage enfin occupe le centre du bassin. Il se compose surtout de marnes grises ou vertes alternant avec des sables fins. On l'observe dans toutes les berges généralement peu élevées de la Loire et de ses affluents, de Montrond jusqu'à Feurs. Près de Montrond, les strates penchent nettement vers le Nord ; en descendant la Loire, on les voit se raplanir et devenir horizontales près de Feurs.

Les travaux du syndicat de Soleillant semblent indiquer que cette formation marneuse, appelée *lauze* dans le pays, se continue sous les alluvions sur la rive droite de la Loire presque jusqu'à la limite du tertiaire et jusqu'au contact du granite.

En somme, ces quatre étages formeraient un système de zones concentriques, allongées en forme d'ellipse, et plus ou moins tronquée vers l'est, où elles viennent toutes buter contre la limite à peu près rectiligne des terrains anciens. Cette disposition est résumée dans le croquis ci-contre.

Nous avons cherché à la faire ressortir en indiquant les quatre étages tertiaires même dans les parties où ils sont recouverts par les alluvions. Ces indications ont un caractère hypothétique, mais elles nous ont paru utiles pour servir de guide aux recherches futures qui pourront rectifier ou confirmer nos conclusions.

Les marnes de Montrond contiennent en abondance la *Cypris Faba* peu caractéristique qui permet seulement de dire miocène.

II. LA NOTICE EXPLICATIVE DE LA CARTE DE MONTRISON

II. La NOTICE EXPLICATIVE de la carte de Montrison donne les indications suivantes :

Aquitanien. — Le terrain tertiaire qui forme la plaine du Forez se compose d'alternances d'argiles et de sables plus ou moins agglomérés, passant aux grès. Des marnes feuilletées, vertes ou grises, avec nombreuses *cypris faba*, dominent au centre de la plaine, autour de Montrond, dans l'étage supérieur. Elles sont entourées d'une bande de sables quart-

zeux fins qu'on peut observer surtout sur les coteaux de Chambon à Meylieu, puis une zone de grès quartzeux grossiers formant un sous-étage inférieur ; il est bien visible surtout sur les berges de la Loire, aux environs de Veauche, sur la falaise de Nervieux, à Cleppé ; à la base, ces grès contiennent des lentilles de calcaires siliceux, très développés vers le sud-ouest, autour de Sury-le-Comtal. On y a trouvé à Saint-Cyprien le *Potamides Lamarcki*. On retrouve des affleurements de calcaire analogues dans les ravins près de Bouthéon, à Saint-Galmier et derrière le château de Soleihan, où ils apparaissent appartenir à des lambeaux tertiaires relevés par la faille limite et entourés par le granite.

Tongrien. — Des sables *feldspathiques*, probablement tongriens, plongent sous ce dernier étage ; à leur sommet se trouvent de puissantes couches d'*argile plastique*, correspondant à la zone marécageuse de la plaine qui se développe sur la rive gauche de Sury-le-Comtal à Pommiers ; les étages de la rive droite reposent au contraire sur la glaise verte de l'étage supérieur (lauze). A la base du tongrien se trouvent des poudingues à galets granitiques. Les ravins qui descendent des montagnes du Forez surtout au nord de Montbrison, donnent de bonnes coupes de cet étage. Il comprend à Amions des argiles réfractaires.

Les différents étages du tertiaires forment des zones successives plongeant vers le centre de la plaine, tronquée à l'est par une faille qui ramène le terrain primitif avec quelques lambeaux isolés de tertiaire inférieur, exploités souvent pour tuileries.

De l'autre côté de la montagne du Forez, le petit bassin d'Ambert se compose d'arkoses tongriennes avec débris de plantes ; il plonge en sens inverse de celui du Forez, et bute à l'ouest contre une faille. Les argiles réfractaires alumineuses de Courpières appartiennent au même étage et se rattachent aux arkoses de la Limagne.

III. MODE DE FORMATION DE CES TERRAINS

LE VERRIER assigne le mode de formation suivante à ces terrains :

1^{er} étage (Tongrien). — Au point de vue du mode de dépôt, le premier étage (Tongrien) forme un ensemble où les éléments deviennent de plus en plus fins à mesure qu'on s'éloigne des bords du bassin. Il est l'œuvre d'une seule période de sédimentation, pendant laquelle les apports venaient du Sud et surtout de l'Ouest : l'étage va s'amincissant et ne contient plus que des argiles au Nord et à l'Est.

Le principal cours d'eau devait déboucher près de Curcieux, au Nord de Montbrison. La rareté des gros galets et la présence de feldspath encore anguleux dans les sables montrent qu'ils ne sont pas un dépôt de cours d'eau développés ni rapides.

Les montagnes du Forez devaient fournir un île modérément élevée : l'éboulement de berges granitiques désagrégées a sans doute donné les éléments des sables qui ont été seulement étalés par les vagues.

Les cours d'eau ont été déposer, plus loin, au centre du bassin, les argiles fines qui forment la partie supérieure de l'étage, et dans lesquelles se sont réunies les paillettes de mica plus friables et plus légères que les autres éléments : les crues ont amené les rares lits de galets et se sables quartzeux qui alternent avec les argiles sur les bords.

Groupe supérieur (Aquitarien). — Quand on passe au second étage (Aquitarien), on constate une séparation brusque et une récurrence d'éléments grossiers, qui indi-

quent un changement de régime. Les trois derniers étages forment un groupe homogène, où les éléments constitutants sont toujours les mêmes, à savoir des fragments de quartz plus ou moins empâtés par l'argile, et où les sédiments deviennent de plus en plus fins, à mesure qu'on s'avance vers le centre. Ce dépôt doit être l'œuvre d'un cours d'eau plus important et plus développé, car tous les éléments moins durs que le quartz ont été réduits en poussière, et le quartz lui-même y est en grains assez petits. L'affluent principal a dû venir du Sud ; c'est de ce côté que les grès de la base sont le plus développés et à plus gros grains.

Discordance entre les deux groupes. — Le second n'est pas en concordance parfaite avec le premier ; en face de Balbigny, derrière Soleillant, à St-Galmier, il paraît reposer directement sur le granite ou sur les terrains anciens, soit que le premier étage ait été raviné avant le dépôt du second, soit qu'il n'ait jamais recouvert ces régions ; en tous cas, il paraît y avoir eu entre ces deux périodes un changement dans le relief du terrain, probablement un affaissement vers le Nord et l'Est, accompagné du creusement de vallées et de bassins plus profonds que pendant la période précédente.

Après la fin de cette seconde période se sont produits des mouvements beaucoup plus importants, qui ont donné définitivement naissance à la chaîne des montagnes du Forez et qui ont produit le relèvement de tous les étages du côté Ouest et la série de failles qui limitent le bassin à l'Est.

IV. LE SONDAGE DE MONTROND

Le sondage de Montrond a été décrit par De Launay dans les termes suivants :

En 1882-1883, à Montrond, canton de Saint-Galmier (Loire), un sondage, qui recherchait la houille, a traversé, au-dessous des sables tertiaires supérieurs du Forez, 40 à 50 mètres de marnes blanches ou vertes de l'étage miocène inférieur, puis est resté, jusqu'à 502 mètres, dans les argiles verdâtres, alternant avec des bancs arénacés, qui sont d'âge permien ou antérieur. On a trouvé dans ce sondage, trois nappes d'eau jaillissantes : l'une douce à 23 m., les autres thermales à 180 m. et 502 m. Le captage a été réalisé au moyen des six tubes suivants : 1^o de 0.410 m. de diamètre, prenant pied à 28 m. ; 2^o de 0.360 m. à 100 m. ; 3^o de 0.310 m. à 225 m. ; 4^o de 0.260 m. à 419 m. ; 5^o de 0.210 m. à 473 m. ; 6^o de 0.125 m. à 502 m. et l'on a eu finalement une source intermittente, jaillissant par ce dernier tube central.

Ce forage qui a rencontré deux nappes thermales à 180 m. et 502 m. fut tubé, comme cela se fait d'habitude, au moyen d'une série de tubes, de diamètre de plus en plus restreint. Pendant le forage, l'eau, d'une façon normale, était toujours dans l'espace annulaire compris entre les deux tubes extrêmes ; mais, quand on arriva à 475 m. de profondeur, il se produisit, dans le tube central qui venait d'être posé jusqu'à 473 m., une gerbe de 35 m. de haut, qui dura vingt minutes et se reproduisit plusieurs fois. Puis, une fois le captage terminé

à 502 m., et tous les intervalles des tubes ayant été obturés, le jaillissement se fit uniquement par le dernier tube central, avec des périodes de paroxysme, suivies de dépressions.

La découverte de la nappe d'eau à 500 m. de profondeur était annoncée en 1882 à l'Académie des Sciences dans les termes suivants par M. LAUR :

Dans un sondage opéré au milieu de la grande plaine du Forez, nous avons atteint, à la profondeur de 502 m. une nappe jaillissante donnant lieu, à des intervalles réguliers, à des éruptions de gaz carbonique, qui projettent à 26 m. de hauteur la colonne d'eau chaude pendant une durée régulière de vingt minutes. Cet écoulement énorme a lieu par un tuyau vertical allant au fond et dont le diamètre n'est pas moindre que 0 m. 21.

Ces jaillissements sont accompagnés d'une série de phénomènes de changement des niveaux d'eau. Nous sommes parvenus à provoquer les jaillissements à heure dite, par une simple mise en charge de la nappe, suivie d'une dépression brusque, ou par des obturations des espaces annulaires.

Etant sur le point de bétonner notre forage, pour capter les eaux thermales, qui sont à 45° au fond et à 29° à la surface, nous avons pensé qu'il convenait de prévenir l'Académie des Sciences, afin qu'on pût, si elle le jugeait utile, étudier le phénomène que nous allons supprimer...

COUPE GEOLOGIQUE

SONDAGE DES SOURCES DU GEYSER A MONTROND (LOIRE)

Interprétation d'après M. Le Verrier

QUATRIÈME ÉTAGE MARNES DE MONTROND

Charpente 0 m. 42	0 m. 42	
Terre végétale	0 m. 55	0 m. 97
Sable argileux gris	1 m. 20	2 m. 17
Graviers et cailloux	2 m. 83	5 m. 06
Argile sableuse verte	2 m. 25	7 m. 31
Argile verte bleuâtre	1 m. 29	8 m. 60
Argile sableuse vert jaune	1 m. 50	10 m. 10
Sable vert et graviers	0 m. 90	11 m. 00
Sable fin argileux	0 m. 30	11 m. 30
Argile sableuse verte	0 m. 10	11 m. 40
Sable argileux vert et pla-		
quettes de grès vert	1 m. 61	13 m. 01
Argile sableuse verte	2 m. 35	15 m. 86
Argile sableuse grise, noi-		
re, pyriteuse	0 m. 89	16 m. 75
Argile sableuse verte	6 m. 12	22 m. 87
		<i>1^{re} nappe jail-</i>
		<i>lissante eau</i>
		<i>douce.</i>
Sable fin vert	0 m. 70	23 m. 57
Sable argileux gris	3 m. 16	26 m. 73
Argile sableuse gris-verdâ-		
tre et argile verte	21 m. 81	48 m. 54.
Argile noir et plaquettes ..	1 m. 28	49 m. 82.
Argile verte	50 m. 62	100 m. 44
		Pied de la co-
		lonne de 410
		mm.
Argile grise et verte	15 m. 41	115 m. 85.
Calcaire siliceux	0 m. 18	116 m. 03.
Argile brune rougeâtre ..	3 m. 84	119 m. 87.
Argile verte	6 m. 48	126 m. 35.
Argile rouge	11 m. 93	138 m. 28.
Argile grise	1 m. 64	139 m. 92.
Grès vert gros grains	0 m. 58	140 m. 50
Argile grise	2 m. 39	142 m. 89.
Argile brune	0 m. 65	143 m. 54.
Argile verte et plaquettes		
de grès	9 m. 76	153 m. 50.

Calcaire siliceux	0 m. 08	153 m. 38	Tiré une ca-
Argile brune et plaquet-		153 m. 38	rotte.
tes dures	7 m. 70	161 m. 08.	
Argile vert et plaquettes	17 m. 64	178 m. 72.	
Sable argileux vert	0 m. 65	179 m. 37.	

THOISIÈME ÉTAGE
(SABLES FINS)

Grès sableux en formation	1 m. 81	181 m. 18.	
Gros sable vert gris	1 m. 50	182 m. 68	2 ^e nappe ther-
Poudingues peu agglomérés	1 m. 13	183 m. 81.	male minéral.
Sable vert	1 m. 37	185 m. 18.	
Argile sableuse verte	0 m. 50	187 m. 24.	
		188 m. 09.	
Sables verts	1 m. 25	190 m. 39.	
Argile sableuse verte	7 m. 24	190 m. 89.	
Sables verts	0 m. 60	192 m. 14.	
		199 m. 38.	
Argile schisteuse verte ..	0 m. 40	199 m. 98	Matière pyriteuse, on cherche à en extraire un peu, on fait une carotte en présence du garde-mines, on ramène que du grès vert à ciment calcaire.
Grès sableux	5 m. 31	205 m. 69.	
Sables et plaquettes de grès	1 m. 82	207 m. 51.	
Sables gris et argile sableuse verte pyriteuse	1 m. 70	209 m. 21.	
Grès très dur	0 m. 86	210 m. 07.	
Argile verte	0 m. 60	210 m. 67.	
Argile brune	0 m. 75	211 m. 42.	
Sable vert fin	1 m. 10	212 m. 52.	
Gros sable vert	5 m. 59	218 m. 11.	
Argile sableuse verte	6 m. 95	225 m. 06	Pied de la colonne de 310 mm.
Gros sable argileux	1 m. 57		
Grès très dur	0 m. 52		
Argile sableuse brune ..	2 m. 91	227 m. 15.	
Grès	0 m. 55	230 m. 06.	

DEUXIÈME ÉTAGE
GRÈS DE VEAUCHE

Argile sableuse verte et plaquettes de grès	6 m. 53	230 m. 61.
Grès calcaire siliceux ..	0 m. 35	237 m. 14.

Sables et plaquettes de grès	5 m. 45	237 m. 49.	
Argile sableuse verdâtre	3 m. 04	242 m. 94.	
Grès	1 m. 00	245 m. 98.	
Argile sableuse verte	1 m. 68	246 m. 98.	
Grès très dur	0 m. 18	248 m. 66.	
Argile sableuse verte	2 m. 69	248 m. 84.	
Grès très dur	1 m. 91	251 m. 53.	
		253 m. 44	3 ^e nappe (?)
			(thermale et
			très minérali-
			sée).
Argile vert et plaquettes.	4 m. 00	257 m. 44.	
Grès très dur et <i>pyrites</i> ..	3 m. 46	260 m. 90.	
Argile verte, <i>pyrites</i> et grès dur	7 m. 71	268 m. 61.	

DEUXIÈME ÉTAGE
GRÈS ET CALCAIRES

Argile sableuse grise et noire	2 m. 50	271 m. 11.	
Grès sableux tendre	2 m. 80	273 m. 91.	
Argile verte et plaquettes	5 m. 02	278 m. 93.	
Grès dur	0 m. 86	279 m. 79.	
Argile sableuse verte et <i>pyrites</i>	1 m. 86	281 m. 65.	
Calcaire siliceux	0 m. 51	282 m. 16.	
Argile sableuse verte et <i>pyrites</i> avec plaquettes	6 m. 77	288 m. 93.	
Grès très dur	0 m. 90	289 m. 83.	
Argile grise et brune ..	2 m. 17	292 m.	
Argile verte et plaquettes de grès	4 m. 56	292 m. 56.	
Grès très dur	0 m. 20	296 m. 76.	
Argile verte et brune	4 m. 84	301 m. 60.	
Grès dur et argile brune	9 m. 46	311 m. 06.	
Grès dur, argile verte et bleue	0 m. 77	311 m. 83.	
Grès dur et argile verte	2 m. 04	313 m. 87.	
Grès dur et argile verte très dure	1 m. 20	315 m. 07.	
Grès et argile verte tendre	1 m. 15	316 m. 22.	
Grès et argile brune et verte	7 m. 48	323 m. 70.	
Argile brune, verte et plaquettes	5 m. 24	328 m. 94.	
Grès, argile brune et verte	4 m. 68	333 m. 62.	
Grès, argile brune et verte dure	1 m. 78	335 m. 40.	
Grès calcaire et argile brune	1 m. 24	336 m. 64.	

Grès calcaire et argile brune	11 m. 52	348 m. 16.	
Grès calcaire et argile brune et verte	5 m. 53	353 m. 69	Descente du
Grès très dur	0 m. 66	354 m. 35	tubage de 260 mm.
Argile verte et brune ..	4 m. 66	359 m. 01.	
Argile verte silicifiée ...	0 m. 25	359 m. 26.	
Argile verte, grès et pla- quettes	6 m. 34	365 m. 60.	
Grès	0 m. 45	366 m. 65.	

PREMIER ÉTAGE

ARGILES ET SABLES FELDSPATHIQUES

Argile verte et brune ..	13 m. 75	379 m. 80.	
Argile verte et pla- quettes	6 m. 85	386 m. 65.	
Argile verte et grès cal- caire	0 m. 65	387 m. 30.	
Argile verte et pla- quettes	4 m. 97	392 m. 27.	
Argile rouge	1 m. 76	394 m. 03.	
Argile verte	8 m. 86	402 m. 89.	
Argile verte et brune ..	1 m. 15	404 m. 04.	
Argile verte	3 m. 82	407 m. 86.	
Argile rouge	10 m. 92	418 m. 78	Pied de la co-
Argile rouge et verte ...	1 m. 78	420 m. 56.	lonne de 260 mm.
Argile blanche et rognons de calcaire	0 m. 49	420 m. 96.	
Argile brune, rouge et verte	5 m. 69	426 m. 56.	
Argile rouge	6 m. 05	432 m. 61.	
Sable argileux vert et cailloux	1 m. 78	434 m. 39.	
Argile sableux rouge et micacé	2 m. 98	437 m. 37.	
Argile rouge et verte micacé	2 m. 06	439 m. 43.	
Argile rouge et verte micacé	3 m. 10	442 m. 53.	
Argile rouge	2 m. 95	445 m. 48.	
Argile rouge verdâtre ..	2 m. 77	448 m. 25.	
Argile sableuse verte ...	0 m. 75	449 m.	
verte	5 m. 44	454 m. 44.	
Argile sableuse rouge et Argile bleuâtre	1 m. 07	455 m. 51.	
Argile brune	2 m. 31	457 m. 82.	
Argile brune	5 m. 64	463 m. 46.	
Argile brune dure	2 m. 08	465 m. 54.	

Argile verte et plaquettes	4 m. 07	469 m. 61.	
Gros sable quartzeux	0 m. 92	470 m. 53.	
Gros sable argileux	0 m. 64	471 m. 17.	
Calcaire siliceux	0 m. 64	471 m. 81.	
Grès vert sableux	11 m. 29	475 m.	Pied de la colonne de 210 mm.
			Commencement de jailliss. à 35 m. de hauteur au-dessus du sol.
Grès vert argileux	1 m. 90	485 m.	
Grès vert et calcaire	0 m. 97	485 m. 97.	
Grès très dur	0 m. 51	486 m. 48.	
Calcaire siliceux	0 m. 42	486 m. 90	4 ^e nappe ther-
Sable gris noir	0 m. 92	487 m. 82.	male, source du geyser n ^o 4.
Sable et plaquettes	0 m. 48	488 m. 30.	
Sable et plaquettes	1 m. 30	489 m. 60.	
Sable argileux vert	1 m. 79	491 m. 39.	
Argile sableuse verte	0 m. 62	492 m. 01.	
Argile brune grise	3 m. 15	495 m. 16.	
Sable gris	4 m. 39	499 m. 55.	
Sable roux très fin et fluent	2 m. 45	502 m.	Pied de la colonne d'ascension (en fer étiré de 125 mm.).

Le sable pulvérulent continue et l'épaisseur de la nappe qui a déjà 27 mètres est inconnue

V. LA COUPE GEOLOGIQUE DU TUBAGE DE SAINT-GALMIER

A St-Galmier un tubage a été fait qui a permis d'atteindre la nappe d'eau dont nous donnons par ailleurs la description chimique. La Cie des eaux a bien voulu nous communiquer la liste des terrains rencontrés par le tubage. Il semble bien qu'il s'agisse tout d'abord de terres végé-

tales, puis d'argiles rouges du Tongrien et enfin du Granite. L'opposition de ces argiles et du granite s'explique par les systèmes de failles secondaires qui sont décrits par ailleurs.

La liste est la suivante :

I. Terre végétale. Epaisseur : 2 m. 10. Profondeur : 2 m. 10.

II. Argile rougeâtre très ferme. Epaisseur : 4 m. 50. Profondeur : 6 m. 60.

Même argile mais sableuse et plus tendre. Epaisseur : 6 m. 88. Profondeur : 13 m. 48.

Argile jaunâtre sableuse très ferme. Epaisseur : 4 m. 27. Profondeur : 17 m. 75.

Argile rouge très ferme : Epaisseur : 1 m. 92. Profondeur : 19 m. 67.

III. Roche en décomposition 1/2 dure. Epaisseur : 2 m. 13. Profondeur 21 m. 80.

Roche granitique rosée, assez dure. Epaisseur : 7 m. 30. Profondeur : 29 m. 10.

Argile sableuse. Epaisseur 0 m. 45. Profondeur : 29 m. 55.

Roche granitique assez dure. Epaisseur 2 m. 92. Profondeur : 32 m. 47.

Roche en décomposition. Epaisseur : 0 m. 67. Profondeur : 33 m. 14.

Roche quartzeuse dure. Epaisseur : 1 m. 43. Profondeur : 34 m. 57.

VI. LE SONDAGE DE SAINT-GALMIER

Le Verrier décrit un sondage dit de St-Galmier qui semble, d'après les coupes rapportées dans son article, dé-

erire plutôt le sondage figuré à Veauche. Voici d'ailleurs la description de LE VERRIER :

Le sondage de St-Galmier ouvert dans le milieu ou vers la base du 2^e étage (grès de Veauche) a recoupé des lits calcaires qui affleurent dans les ravins de Volon et correspondent probablement à ceux de St-Cyprien : puis vers 50 mètres, il s'est enfoncé dans les argiles rouges très micacées et est resté dans le premier étage qui paraît avoir là près de 300 m. d'épaisseur.

B. Étude géologique de la plaine de Roanne

Plusieurs points sont à envisager :

I. Le Verrier donne la description suivante des plaines tertiaires :

Tongrien. — Le terrain tongrien forme la plus grande partie du sous-sol de la plaine de Roanne.

Il se compose de grès feldspathiques à fragments souvent argileux, d'argiles, de quelques lits de cailloutis où dominant les galets de granite ; les silex y sont rares, généralement de petite taille et peu roulés. Cette différence de composition avec les cailloutis pliocènes dont il sera question ci-dessous doit tenir à la différence du régime hydrographique, car l'érosion des couches bathoniennes, qui ont fourni les silex des alluvions pliocènes, devait être déjà fort avancée lors du dépôt du miocène, qui repose en bien des points sur le lias.

C₂ terrain peut s'observer sur une ligne de falaises sablonneuses qui s'étend de Perreux à Vougy, dominant les allu-

vions modernes, et représente l'ancienne berge de la Loire. On le voit aussi sur la rive gauche au-dessus de Briennon où il recouvre le calcaire oolithique exploité dans de nombreuses carrières, et est lui-même recouvert par des alluvions.

Les ravins sur la limite orientale de la plaine montrent en quelques points (entre Renaison et Saint-Haon), les couches d'arkose. Les dépôts tongriens alimentent de nombreuses tuileries et fournissent quelques carrières de sable.

La seule donnée paléontologique que l'on possède à leur sujet, à ma connaissance, consiste en ossements qui ont été montrés à la Société Géologique en 1873 et examinés sur place par M. Pomel. Ce savant y a reconnu une dent d'*anthracotherium* ou d'*elotherium*.

L'analogie avec les bassins environnants (Limagne, Forez, Allier), suffit du reste pour fixer à peu près l'âge de ces terrains.

Aquitanien. — A Vivans, à la Pacaudière, à Saint-Germain-Lespinasse, on trouve des marnes grises, avec rognons calcaires, peu épaisses, qui recouvrent le tongrien et représentent sans doute l'aquitanien.

Elles sont recouvertes par des sables quartzeux à éléments analogue à celui du tertiaire du Forez, mais avec une plus réguliers et plus roulés que ceux des niveaux inférieurs.

Tout cet ensemble offre en somme une composition très sance plus réduite. Le tongrien ne peut guère être évalué à plus de 200 m., l'aquitanien à 30 ou 50.

II. La Notice explicative de la carte de Roanne donne les indications suivantes :

Les *terrains oligocènes* ont une légère pente vers le N.-O. ; du côté ouest, le bassin est tronqué par une grande faille qui suit toute la côte d'Ambierle, et qui a relevé le granite de 500 mètres au moins. Les *Arkoses* et sables feldspathiques occupent la plus grande partie de la plaine ; on peut en voir des coupes aux coteaux de Perreux, d'Artaix, et dans les vallées entre Renaison et Saint-Haon ; ils alternent avec des

argiles exploitées pour tuileries, surtout à la partie supérieure de l'étage. On y a rattaché un lambeau de sable granitique qui se trouve sur les hauteurs de Saint-Martin-Lixy, au-dessus du calcaire oolithique, et qui a sans doute été relevé là par des failles. Dans la partie ouest de la plaine apparaissent (à Saint-Germain-l'Espinasse, à Saint-Germain-la-Motte) des marnes grises et des lentilles **de calcaires à phryganes**, d'épaisseur assez faible, qu'on ne voit guère qu'en morceaux épars dans les champs. A la Pacaudière et à Sail, cet étage est mis en contact direct avec le granite, par la faille de la Côte. Il est recouvert de sables **quartzeux grossiers** qui représentent sans doute la partie supérieure de l'oligocène, mais qu'il est difficile de bien séparer du pliocène qui s'étend au-dessus.

Dans la région de la Palisse, on voit dans quelques vallées profondes, notamment au sud d'Isserpent, des bancs inclinés d'*Arkose* sous les sables pliocènes, et au contact du granite.

A l'ouest de la plaine, les premiers coteaux sont formés par des terrains secondaires, que divisent de nombreuses failles.

III La notice de la carte de Roanne donne la description suivante de la partie alluviale :

Alluvions. — Les plateaux des deux côtés de la Loire sont couronnés par des dépôts assez épais de galets de silex roulés, empruntés sans doute aux couches bathoniennes, qui ont disparu dans toute la région. Ce cailloutis (P) ne se montre qu'à une certaine hauteur au-dessus de la Loire (une centaine de mètres environ), d'autre part il s'arrête en général, à une cote peu supérieure à 500 : son niveau va en s'élevant à mesure qu'on s'éloigne du fleuve.

Les alluvions anciennes de la Loire et de ses affluents sont beaucoup moins riches en silex, elle en sont à peu près dépourvues sur la rive gauche. Elles forment des terrasses étroites le long de la rive droite. Sur la rive gauche elles couronnent tous les plateaux tertiaires dont la cote reste inférieure au niveau moyen du pliocène (330 m. environ). Des restes d'éléphas *primigenius*, de renne et de cheval trouvés dans ces alluvions près de Saint-Germain-Lespinasse, sont déposés au musée de Roanne.

Couches de silex. — On trouve sur les bords du bassin tertiaire, à Charlieu, à Chandon, une formation assez bizarre. Ce sont des amas de très gros silex zonés en parallélipipèdes juxtaposés de manière à constituer une sorte de dallage. Ce phénomène ne s'observe qu'en des points où le tertiaire repose sur les couches les plus récentes de l'oolithe : les dépôts en question occupent donc la place où devait se trouver autrefois le bathonien qui a fourni les silex des alluvions. Il est probable que ce sont les restes des couches siliceuses, qui après la dissolution du calcaire ambiant se sont affaissées sur place en se brisant, mais sans se disloquer complètement.

C. Etude chimique des différentes roches

Nous avons étudié des roches appartenant aux quatre étages précédemment décrits dans la plaine du Forez.

1° Au premier étage, appartiennent des sables feldspatiques recueillis au niveau d'un affleurement situé le long d'un chemin creux entre Montbrison et la montagne d'Uzore.

A cet étage appartiennent encore des argiles brunes recueillies dans le sondage de Montrond à 460 m. de profondeur.

2° Au deuxième étage appartiennent des grès, calcaires et argiles brunes recueillies à 348 m. de profondeur, dans le sondage de Montrond.

Des grès très durs et pyrites recueillis à 260 m. 9 de profondeur, dans le sondage de Montrond.

3° Au troisième étage appartiennent des grès sableux verts recueillis à 199 m. de profondeur, dans le sondage de Montrond.

4° Au quatrième étage appartiennent des marnes bleues recueillies dans la cour du château de Montrond.

Des argiles rousses recueillies à 126 m. 35 de profondeur dans le sondage de Montrond.

Des argiles vertes recueillies à 100 m. 44 de profondeur dans le sondage de Montrond.

Les argiles sableuses vertes recueillies à 16 m. 75 de profondeur dans le sondage de Montrond.

Voici d'abord l'analyse chimique de ces roches.

1^{er} Etage affleurement.

SABLE FELDSPATHIQUE

SiO ²	61,8 %	CaO	0,182 %
SO ⁴	2,42 %	MgO	3,75 %
CO ²	3 %	K +	6,4 %
Cl	1,08 %	Na +	0,20 %
Al ² O ³	3,34 %	Li	Néant
Fe ² O ³	16 %	H ² O	0,80 %

1^{er} étage.

ARGILE BRUNE (460 m.)

SiO ²	54,8 %	CaO	11,20 %
SO ⁴	2,75 %	MgO	3,40 %
CO ²	0,16 %	K +	2,25 %
Cl	Traces	Na	0,10 %
Al ² O ³	15,14 %	Li	Traces
Fe ² O ³	5,44 %	H ² O	1,20 %

2^e étage coupe.

GRES CALCAIRE ET ARGILE BRUNE (348 m.)

SiO ²	35 %	CaO	7,4 %
SO ⁴	1,72 %	MgO	1,24 %
CO ²	7,15 %	K +	3,17 %
Cl	Traces	Na	0,45 %
Al ² O ³	18,40 %	Li	Traces
Fe ² O ³	17,35 %	H ² O	2,70 %

GRES TRES DUR ET PYRITE (260 m. 90)

SiO ²	29,8 %	MgO	3,75 %
CO ²	0,86 %	K +	5 %
Al ² O ³	12,2 %	Na	1,05 %
Fe ² O ³	31,11 %	Li	Néant
CaO	9,25 %	H ² O	1,5 %

GRES SABLEUX VERT (199 m.)

SiO ²	39,8 %	CaO	5,258 %
SO ⁴	4,1 %	MgO	2,72 %
CO ²	0,46 %	K+	4,88 %
Cl	0,8 %	Na	0,91 %
Al ² O ³	12,40 %	Li	Néant
Fe ² O ³	17,48 %	H ² O	1,92 %

MARNE BLEUE DE MONTROND

SiO ²	49,64 %	CaO	8 %
SO ⁴	4,28 %	MgO	1,85 %
CO ²	Traces	K+	8,18 %
Cl	3,56 %	Na+	3,20 %
Al ² O ³	14,59 %	Li	Néant
Fe ² O ³	6,43 %	H ² O	2,55 %

ARGILE ROUGE (126 m. 35)

SiO ²	43,17 %	CaO	1,80 %
SO ⁴	2,56 %	MgO	2,92 %
CO ²	0,52 %	K+	2,15 %
Cl	0,54 %	Na	0,08 %
Al ² O ³	17,08 %	Li	Néant
Fe ² O ³	11,54 %	H ² O	4,60 %

ARGILE VERTE (100 m. 44)

SiO ²	58,2 %	CaO	4,894 %
SO ⁴	1,15 %	MgO	1,045 %
CO ²	6,12 %	K+	1,40 %
Cl	0,25 %	Na	Néant
Al ² O ³	9,96 %	Li	Néant
Fe ² O ³	7,04 %	H ² O	3,6 %

ARGILE SABLONNEUSE VERTE (16 m. 75)

SiO ²	33,4 %	CaO	12,6 %
SO ⁴	0,92 %	MgO	2,8 %
CO ²	7,20 %	K+	2,6 %
Cl	Traces	Na+	Traces
Al ² O ³	19,20 %	Li	Néant
Fe ² O ³	20,8 %	H ² O	1,5 %

D. Etude microscopique d'un certain nombre de ces roches

Nous avons étudié les roches suivantes :

Marnes bleues.

Marnes pauvres en quartz détritique et en produits micacés.

Produits colloïdaux abondants.

Argile rouge et verte 420 m.

Argile pauvre en quartz, mais riche en produits biréfringents.

Montrond. Argile verte.

Très semblable à la précédente.

Montrond. Grès sableux 206 m.

Débris anguleux de quartz, de feldspath, unis dans un ciment de calcite très finement cristallisée.

Résumé du chapitre IV

Des considérations précédentes il semble résulter que les éléments ioniques des eaux de lavage peuvent être attribués de la façon suivante aux roches que nous venons d'étudier :

1° La silice paraît surtout abondante dans les sables feldspathiques et dans les argiles brunes du Tongrien (1^{er} étage). Ajoutons que dans les argiles brunes, la silice est à l'état colloïdal ce qui facilite sa dissolution. Les argiles rouges du 4^e étage en contiennent, elles aussi, une assez grande quantité.

2° L'ion SO^4 est surtout abondant dans les grès sableux verts et dans les marnes bleues de Montrond.

3° L'anhydride carbonique est partout inférieur à 7 %, il ne joue probablement qu'un rôle secondaire, la véritable provenance de l'anhydride carbonique des eaux étant une origine profonde.

4° L'alumine peut être fournie par toutes les argiles que nous avons examinées.

5° Le fer apparaît sous forme de dépôt de pyrite à tous les étages, surtout aux 2^e et 4^e étage.

6° Le calcium est surtout important pour les argiles brunes du 1^{er} étage et pour les argiles du 4^e étage.

7° Le magnésium est surtout important au 1^{er} étage dans les sables feldspathiques et au 2^e étage dans les grès à pyrite.

8° Le potassium est très important dans les grès feldspathiques du 1^{er} étage.

CHAPITRE V

ETUDE DES POINTEMENTS BASALTIQUES

Nous avons pensé que les pointements basaltiques pouvaient dans certains cas servir de guide à des venues hydrominérales et leur permettre de cheminer vers leur source. Pendant ce parcours les contacts établis entre l'eau et le basalte permettent sans doute la dissolution de certaines roches, c'est pourquoi nous avons pensé qu'il serait utile de procéder à leur étude chimique. Nous l'avons fait sur un fragment de roches recueilli à la montagne d'Uzore.

Nous décrirons successivement dans ce chapitre :

L'étude géologique des basaltes.

Leur étude chimique.

I. Etude géologique des basaltes

Le Verrier en donne la description suivante :

Pointements basaltiques. — Sur le bord oriental de la plaine du Forez, et au milieu des montagnes granitiques qui s'étendent à l'ouest, on trouve de nombreuses buttes de basalte, presque toutes formant des monticules coniques. Quelques-unes ont une forme plus aplatie et paraissent être des débris des coulées peu étendues : tel est le mont Semiol situé à l'est de Chatelneuf, où une nappe de basalte couvre,

sur une largeur de 800 mètres et une longueur de 1500, le plateau granitique qui domine la profonde vallée de Vizery. Les buttes de Cezay, de Palogneux (au-dessus de Sail), bien plus restreintes, se présentent aussi sous la forme d'ellipses allongées, avec une hauteur régulière assez faible ; la dernière est divisée en prismes verticaux ; c'est le seul exemple que je connaisse de cette disposition dans les basaltes du Forez.

Le mont d'Uzore, situé au milieu des argiles tongriennes, s'allonge du Nord au Sud sur un parcours de 4 kilomètres avec une largeur de 400 mètres, et semble représenter un énorme dyke. Vers les deux tiers de sa longueur, à partir du Sud, il fait un coude en se dirigeant vers le N.-N.-E. ; et au point de concours de ces deux directions, se trouve une butte conique plus large et plus élevée que le reste de la montagne. Les deux buttes de Montverdun situées à peu de distance au nord, jalonnaient du reste le prolongement de la première branche du dyke, tandis qu'une série d'autres buttes (Pralong, Boissieu, etc.) jalonnait vers le S.-O. de la seconde branche. La butte de Marcoux, au nord de Marcilly, se présente aussi comme un cône flanqué de deux prolongements en forme de dykes, vers le N.-O. et le S.-E. En d'autres points, l'allongement apparent des buttes basaltiques résulte de la juxtaposition de plusieurs cônes : ainsi à Fontvial, à l'Ouest de Saint-Romain-le-Puy, quatre buttes presque contiguës se suivent sur une ligne dirigée N.-O. A Hauteroche, au dessus de Champdieu, deux buttes contiguës s'alignent sur une orientation E.-O., dont le prolongement va passer par les buttes voisines du Puy Grillot et de Bucherol.

Au point de vue pétrographique, ces roches n'offrent rien de remarquable. Ce sont des basaltes labradoriques assez riches en olivine : la pâte paraît compacte ou légèrement grenue ; elle est toujours très cristalline au microscope. La structure et la composition sont tout à fait identiques à celles du basalte des plateaux de l'Auvergne.

Pépérîtes. — Lorsqu'ils percent le terrain tertiaire, les basaltes s'accompagnent presque toujours de pépérîtes. Ce sont des mélanges bréchoïdes de fragments anguleux de

basalte et d'argile altérée. On peut les observer en grande abondance tout autour de la butte de Saint-Romain-le-Puy, du Mont d'Uzore, entre les buttes de Hauteroche où l'on voit des paquets d'argile entourée par la roche éruptive. Parfois les grains de basalte y sont arrondis, et quand ils deviennent moins nombreux, on pourrait les prendre pour des galets roulés mélangés aux sédiments tertiaires. Cette apparence peut s'observer par exemple dans une tranchée du canal, à l'Est de Saint-Romain-le-Puy, et dans un petit monticule situé à moitié chemin entre Mornand et Champdieu. En y regardant de plus près, on voit que la répartition de ces grains basaltiques est absolument irrégulière et accidentelle, leur grosseur et leur forme très variables contrastent avec la régularité des fragments clastiques constituant les dépôts tertiaires où on les roue. Ces particularités s'accordent mal avec l'idée d'une origine sédimentaire. Du reste, l'aspect bréchoïde des pépérites voisines ne laisse aucun doute sur leur origine éruptive, et l'altération subie par les argiles au contact des pointements de basalte, montre nettement que l'éruption est postérieure à tout le dépôt du miocène.

Argiles rouges. — Au contact du basalte, les argiles tertiaires sont durcies, et dans son voisinage elles sont fortement rubéfiées sur de grandes étendues. Dans toute la région tongrienne qui a été traversée par l'éruption et qui s'étend au Sud du Lignon, on rencontre souvent les sables et les argiles rouges formant comme de grandes taches ; ce sont peut-être, comme l'a dit Gruner, des indices de buttes basaltiques qui sont restées recouvertes et qu'on trouverait en profondeur. A Poncins, ces argiles rouges sont associés à des pépérites.

Dans le terrain aquitainien, on ne trouve plus de basalte massif, mais on y rencontre trois buttes de pépérite, à Poncins et à Boisset, au milieu des grès de l'étage inférieur, à Montrond, au milieu des marnes vertes supérieures. Cette dernière forme le soubassement du château, et à côté, dans le lit de la Loire, près du confluent de la Coize, on voit un très petit affleurement de basalte.

Sources minérales. — Des sources carboniques, légèrement ferrugineuses ont été rencontrées en divers points autour de la butte basaltique de Saint-Romain-le-Puy, une source analogue est exploitée à Moingt, sur la ligne qui joint cette butte aux pointements de Montbrison, de Champdieu, etc... A Montrond, le sondage situé à côté de la butte de pépérites, a recoupé plusieurs venues d'eaux minérales, et enfin une source importante à la profondeur de 500 mètres. Cette association des basaltes avec des sources minérales explique la rubéfaction des argiles, signalée plus haut.

Age de l'éruption. — L'éruption des basaltes est postérieure à l'oligocène. Elle est d'autre part antérieure au creusement des vallées actuelles. Les cônes situés dans la région granitique sont tous sur les plateaux, aucun d'eux ne se trouve dans les vallées qui souvent en contournent la base. La coulée du Mont Sémiol, dont j'ai parlé plus haut, se termine par un escarpement à pic au-dessus du ravin du Vize-ray, et ne descend pas sur les pentes. Près de Pralong, une vallée assez profonde rencontre à son débouché dans la plaine tertiaire la butte du Haut de Montecey constitué par un cône de basalte affleurant au sommet, et entouré par les sables congriens qui recouvrent ses flancs ; le ruisseau se dévie et fait le tour de cette butte ; on peut signaler une disposition analogue à Marcilly et au Calvaire de Montbrison. Si ces cônes avaient surgi en travers des vallées après leur creusement, ils ne seraient pas entourés de sédiments tertiaires, car on ne s'expliquerait pas que l'érosion eût respecté ceux-ci précisément aux points où le basalte devait sortir plus tard : le ruisseau, au sortir du granite, aurait suivi son cours en droite ligne comme cela arrive au débouché des autres ravins. Ainsi par son mode de gisement comme par sa structure, cette roche se rattache au basalte des plateaux, et est sans doute d'âge pliocène.

Répartition et alignement des basaltes. — Dans leur ensemble les pointements basaltiques couvrent une zone dirigée N.-N.-O. et bordant la plaine du Forez. On peut y distinguer plusieurs alignements :

1° Près de la limite de la plaine et au milieu du tongrien inférieur, les cônes de Saint-Romain-le-Puy, de Montbrison, de Champdieu, de Marcilly dessinent une ligne dirigée N.-N.-O. ; son prolongement vers le Nord entre dans le terrain ansien où il rencontre les buttes de Marcoux, Boën, de Cesay. Trois autres pointements, parmi lesquels celui de Palogneux, jalonnent une sorte de bifurcation de cette ligne éruptive, et suivent la faille du Forez qui la croise à Marcilly. Cette faille qui sépare les terrains de transition du granite, est jalonnée par des filons de quartz triasique et des sources minérales. J'ai déjà signalé les sources échelonnées entre Saint-Romain-le-Puy et Montbrison. A Marcoux, le basalte est traversé par des filonnets calcaires qui se suivent au Sud à travers le tertiaire.

2° Une autre ligne de pointements éruptifs, à peu près parallèle à la précédente mais obliquant un peu plus vers l'Ouest, se suit à travers les montagnes granitiques de Fontvial à Chalmazel, en passant par Bard et Chatelneuf. Dans sa partie sud, de Fontvial à Lésigneux, cette ligne forme une faille nette, séparant le gneiss (à l'Est), du granit (à l'Ouest) ; plus loin la faille est moins évidente, mais des filons de quartz triasique jalonnent la même direction près d'Ecotay et d'Essertines. Au delà de Chalmazel, cette ligne sépare encore le gneiss du granite.

Ces deux séries de pointements se trouvent donc sur des fractures qui ont leur rejet vers l'Est et dont le jeu est sans doute la cause du relief actuel des montagnes du Forez dont elles suivent le pied. Il est à remarquer qu'on trouve sur leur trajet toutes les manifestations possibles de l'activité interne, roches éruptives, sources minérales, filons quartzeux et métallifères. Or, si les unes sont récentes, les autres (quartz triasique) sont très anciennes. Il semble donc que dans cette région les mouvements pliocènes aient eu surtout pour effet de faire rejouer d'anciennes fractures.

3° Un troisième alignement parallèle aux deux premiers, s'étendrait de Chazelles-sur-Lavieu, aux buttes de Pierre-Basanne et de la Roche-Gourgon, situés sur les hauts pla-

teaux des Monts du Forez : il est suivi par le filon de quartz cuprifère de Gumières.

4° D'autres cônes paraissent se grouper sur des lignes transversales aux premières, mais moins bien accusées. La région située au N.-O. de Montbrison est plus que tout autre criblée de basalte, et cette série de pointements multiples couvre une zone dirigée N.-E., allant de Pierre-Basanne à Champdieu, et se prolongeant dans la plaine par le Mont d'Uzore et la butte de Poncins. Une autre ligne N.-E. irait de Chazelles à Saint-Romain-le-Puy, en passant par les cônes du mont Supt, de Lavieu ; son prolongement rencontrerait dans la plaine les buttes de pépérite de Boisset et de Montrend ; il irait passer de l'autre côté du bassin tertiaire à Saint-Cyr-les-Vignes où se trouve une faille très nette, suivant la même direction, qui a rejeté le tertiaire et le sépare du granite.

C'est vers les points de croisement de ce réseau de fractures que se rencontrent les masses basaltiques les plus considérables, comme celles du Mont-Sémiol, de Marcoux, de Champdieu.

Pointements souterrains. — J'ai signalé l'absence du basalte dans l'étage aquitainien. La présence de buttes de pépérites montre que des pointements éruptifs doivent exister en profondeur, mais qu'ils n'ont pu percer complètement cet étage. Les argiles rubéfiées qu'on trouve au milieu semblent aussi les indices de gisements de basalte souterrain. Je suis porté à croire que la plupart des cônes actuellement découverts n'ont pas non plus percé jusqu'au jour à l'époque de leur éruption. En effet, avant la période de creusement des vallées, l'érosion du tertiaire devait être beaucoup moins avancée : l'aquitainien devait subsister sur une grande étendue au-dessus du tongrien, ce dernier devait recouvrir assez loin les pentes des montagnes où on retrouve des traces jusqu'à une grande hauteur. On ne peut certainement évaluer à moins de cent mètres au minimum l'épaisseur moyenne des terrains qui ont été enlevés depuis dans toute cette région. Or la plupart des cônes n'atteignent pas cette hauteur et devaient être enterrés. Plusieurs d'entre eux por-

tent du reste encore des paquets d'argile ou des pépites à leur sommet.

On comprend que la lave, une fois arrivée au milieu des sables et des argiles du tongrien n'a pu continuer son mouvement ascensionnel sous forme de filon : le terrain était trop incohérent pour supporter la pression qu'elle aurait exercée sur les parois. Elle s'est donc épanchée en le refoulant tout autour du point de sortie : mais la résistance du milieu l'a empêchée de s'étaler en nappes et lui a fait prendre la forme d'amas coniques. Ce mode de formation expliquerait bien l'abondance des pépérites, c'est-à-dire des brèches de mélange avec le terrain encaissant. La lenteur de refroidissement de ces masses enterrées leur a permis de se contracter sans se diviser en prismes. Si cette hypothèse est juste, la rareté des galets de basalte dans les alluvions anciennes tiendrait non pas à ce que ces dépôts se sont formés avant les éruptions, mais à ce que la plupart des pointements n'étaient pas encore découverts au début de la période d'érosion.

La Notice explicative de la carte de Montbrison donne les indications suivantes :

Des buttes nombreuses de *basalte labradorique* se rencontrent tout le long de l'affleurement ouest du tongrien inférieur et aussi dans les montagnes granitiques du Forez, tout le long d'une bande parallèle à la limite du tertiaire. Bien que l'éruption de ce basalte soit certainement postérieure à tout le dépôt du miocène, il ne perce que rarement les étages supérieurs où l'on ne trouve que quelques pointements de pépérites.

II. Description chimique des roches basaltiques

Clarke donne les descriptions suivantes de basalte de diverses provenances.

1. — Kula, Lydia (Asie-Mineure) (Washington) contenant :

anorthite, albite, orthoclase, nephelite, diopside, olivine, magnetite, apatite :

SiO₂ : 48,35 ; Al₂O₃ : 19,94 ; Fe₂O₃ : 2,48 ; FeO : 5,25 ; MgO : 5,15 ; CaO : 7,98 ; Na₂O : 5,47 ; K₂O : 3,99 ; H₂O : 0,16 ; H₂O+ : 0,22 ; TiO₂ : 0,12 ; P₂O₅ : 0,84 ; MnO : Traces.

2. — Kula (Washington) contenant : anorthite, albite, leucite, nephelite, diopside, olivine, magnetite :

SiO₂ : 49,90 ; Al₂O₃ : 19,89 ; Fe₂O₃ : 2,55 ; FeO : 4,78 ; MgO : 0,05 ; CaO : 7,21 ; Na₂O : 5,60 ; K₂O : 3,74 ; H₂O : 0,13 ; H₂O+ : 0,19 ; TiO₂ : 0,93 ; P₂O₅ : Traces ; MnO : Traces.

3. — Pinto Mountain, Uvalde County, Texas (Hillebrand), contenant : olivine, augite, plagioclase, magnetite, apatite, feldspathe :

SiO₂ : 45,11 ; Al₂O₃ : 12,44 ; Fe₂O₃ : 2,67 ; FeO : 9,36 ; MgO : 11,56 ; CaO : 10,61 ; Na₂O : 3,05 ; K₂O : 1,01 ; H₂O : 0,16 ; H₂O+ : 0,78 ; TiO₂ : 2,34 ; P₂O₅ : 0,51 ; S : 0,01 ; Cl : 0,11 ; V₂O₃ : 0,04 ; MnO : 0,22 ; NiO : 0,04 ; BaO : Traces ; SrO : Traces ; LiO : Néant.

4. — Highwood Mountains, Montana (Foote), contenant : augite, olivine, biotite, leucite, analcite, fer et apatite :

SiO₂ : 46,04 ; Al₂O₃ : 12,23 ; Fe₂O₃ : 3,86 ; FeO : 4,60 ; MgO : 10,38 ; CaO : 8,97 ; Na₂O : 2,42 ; K₂O : 5,77 ; H₂O et H₂O+ : 2,87 ; TiO₂ : 0,64 ; P₂O₅ : 1,14 ; SO₃ : Traces ; Cl : 0,11 ; MnO : Traces ; BaO : 0,48 ; SrO : 0,25.

5. — San Venanzo, Umbria, Italy (Rosembusch, Sitzungsber. Akad.), contenant : olivine, melilite, leucite, biotite, magnetite, zeolite, nephelite :

SiO₂ : 41,43 ; Al₂O₃ : 9,80 ; Fe₂O₃ : 3,28 ; FeO : 5,15 ; MgO : 13,40 ; CaO : 16,62 ; Na₂O : 1,64 ; K₂O : 7,40 ; H₂O et H₂O+ : 1,11 ; TiO₂ : 0,29 ; P₂O₅ : Néant.

6. — Tom Munn's Hill, Uvalde County, Texas (Hillebrand), contenant : olivine, augite, nephelite, magnetite et apatite.

SiO₂ : 40,32 ; Al₂O₃ : 9,46 ; Fe₂O₃ : 4,75 ; FeO : 7,48 ; MgO : 18,12 ; CaO : 10,55 ; Na₂O : 2,62 ; K₂O : 1,10 ; H₂O : 0,57 ; H₂O+ : 1,25 ; TiO₂ : 2,66 ; P₂O₅ : 0,68 ; S : 0,01 ; SO₃ : Traces ; Cl : 0,05 ; F : 0,04 ; MnO : 0,25 ; NiO : 0,06 ; BaO : 0,06 ; SrO : 0,03 ; Li₂O : Traces.

7. — Black Mountain, Uvalde County, Texas (Hillebrand), contenant : olivine, augite, nephelite, magnetite et apatite.

SiO₂ : 39,92 ; Al₂O₃ : 8,60 ; Fe₂O₃ : 4,40 ; FeO : 8,00 ; MgO : 20,17 ; CaO : 10,68 ; Na₂O : 1,91 ; K₂O : 1,03 ; H₂O : 0,43 ; H₂O+ : 1,45 ; TiO₂ : 2,70 ; P₂O₅ : 0,51 ; S : Traces ; Cl : Traces ; F : 0,07 ; V₂O₃ : 0,04 ; Cr₂O₃ : 0,14 ; MnO : 0,24 ; NiO : 0,06 ; BaO : 0,06 ; SrO : 0,04 ; Li₂O : Traces.

8. — Près Uvalde, Texas (Hillebrand), contenant : nephelite, melilite, olivine, augite, apatite et magnetite.

SiO₂ : 37,96 ; Al₂O₃ : 10,14 ; Fe₂O₃ : 3,69 ; FeO : 7,59 ; MgO : 14,69 ; CaO : 16,28 ; Na₂O : 2,18 ; K₂O : 0,69 ; H₂O : 0,39 ; H₂O+ : 1,82 ; TiO₂ : 2,93 ; P₂O₅ : 1,13 ; S : 0,04 ; SO₃ : 0,03 ;

Cl : Traces ; F : 0,07 ; V₂O₃ : 0,05 ; Cr₂O₃ : 0,08 ; MnO : 0,22 ; NiO : 0,04 ; BaO : 0,06 ; SrO : 0,05 ; Li₂O : Traces.

9. — Basalte Table Mountain, Colorado (Eakins), contenant : augite, olivine, plagioclase, probablement orthoclase, magnetite, apatite, biotite.

SiO₂ : 49,69 ; Al₂O₃ : 18,06 ; Fe₂O₃ : 2,64 ; FeO : 6,19 ; MgO : 5,73 ; CaO : 8,24 ; Na₂O : 2,99 ; K₂O : 3,20 ; H₂O et H₂O+ : 0,91 ; TiO₂ : 0,85 ; P₂O₅ : 0,81 ; Cl : 0,13 ; MnO : 0,13.

10. — Basalte Saddle Mountain, Pikes Peak, Colorado (Hillebrand), contenant : augite, olivine, plagioclase, orthoclase, magnetite, biotite et apatite.

SiO₂ : 48,76 ; Al₂O₃ : 15,89 ; Fe₂O₃ : 6,04 ; FeO : 4,56 ; MgO : 5,98 ; CaO : 8,15 ; Na₂O : 3,43 ; K₂O : 2,93 ; H₂O : 0,40 ; H₂O+ : 1,48 ; TiO₂ : 1,65 ; P₂O₅ : 0,60 ; MnO : 0,13 ; BaO : 0,17 ; SrO : 0,06.

11. — Basalte quarizeux Cinder Cone, Lassen Peak, Californie (Hillebrand), contenant plagioclase, pyroxène, olivine, quartz, magnetite, augite.

SiO₂ : 57,25 ; Al₂O₃ : 16,45 ; Fe₂O₃ : 1,67 ; FeO : 4,72 ; MgO : 6,74 ; CaO : 7,65 ; Na₂O : 3,00 ; K₂O : 1,57 ; H₂O et H₂O+ : 0,40 ; TiO₂ : 0,60 ; P₂O₅ : 0,20 ; MnO : 0,10 ; BaO : 0,03 ; SrO : Traces ; Li₂O : Néant.

12. — Basalte San Joaquin River, Madera County, Californie (Hillebrand), contenant : pyroxène, augite, plagioclase, olivine et minéral de fer.

SiO₂ : 51,89 ; Al₂O₃ : 15,28 ; Fe₂O₃ : 3,10 ; FeO : 3,60 ; MgO : 8,68 ; CaO : 7,38 ; Na₂O : 3,27 ; K₂O : 2,57 ; H₂O : 1,17 ; H₂O+ : 1,37 ; TiO₂ : 0,91 ; P₂O₅ : 0,61 ; MnO : 0,12 ; NiO : 0,02 ; BaO : 0,15 ; SrO : 0,09 ; Li₂O : Trace.

13. — Basalte Mc. Cloud River, Mount Shasta, Californie (Stokes), non décrit.

SiO₂ : 47,94 ; Al₂O₃ : 18,90 ; Fe₂O₃ : 2,21 ; FeO : 8,59 ; MgO : 8,21 ; CaO : 9,86 ; Na₂O : 2,81 ; K₂O : 0,29 ; H₂O : 0,39 ; H₂O+ : 0,74 ; TiO₂ : 0,57 ; P₂O₅ : 0,15 ; MnO : Traces ; BaO : Néant. SrO : Néant ; Li₂O : Traces.

14. — Basalte de Saint-Raphaël flow, Colfax County, New Mexico (Hillebrand), contenant : plagioclase, augite, olivine, iddingsite, magnetite et apatite.

SiO₂ : 48,35 ; Al₂O₃ : 15,47 ; Fe₂O₃ : 4,80 ; FeO : 7,58 ; MgO : 8,15 ; CaO : 8,81 ; Na₂O : 3,09 ; K₂O : 0,95 ; H₂O : 0,28 ; H₂O+ : 0,73 ; TiO₂ : 1,33 ; P₂O₅ : 0,33 ; SO₃ : 0,07 ; MnO : 0,21 ; NiO : 0,02 ; BaO : 0,06 ; SrO : 0,03 ; Li₂O : Traces.

15. — Basalte de Pine Hill, South Britain, Connecticut (Hillebrand), contenant : plagioclase, augite, olivine et magnetite.

SiO₂ : 52,40 ; Al₂O₃ : 13,55 ; Fe₂O₃ : 2,73 ; FeO : 9,79 ; MgO : 5,53 ; CaO : 10,01 ; Na₂O : 2,32 ; K₂O : 0,40 ; H₂O : 0,62 ; H₂O+ : 1,00 ; TiO₂ : 1,08 ; P₂O₅ : 0,12 ; MnO : 0,26 ; NiO : Traces ; BaO : Traces ; SrO : Néant ; Li₂O : Néant ; FeS₂ : 0,13.

GRANGEAUD donne de basaltes ou de roches voisines la description suivante :

LA DOMITE DU PUY DE DOME

16. — SiO₂ : 66,70 ; Al₂O₃ : 16,60 ; Fe₂O₃ : 2,33 ; FeO : 0,87 ; MgO : 1,08 ; CaO : 1,48 ; Na₂O : 5,80 ; K₂O : 4,60 ; TiO₂ : 0,40 ; P₂O₅ : 0,06.

17. — SiO₂ : 65,55 ; Al₂O₃ : 16,81 ; Fe₂O₃ : 2,26 ; FeO : 1,11 ; MgO : 0,41 ; CaO : 2,07 ; Na₂O : 6,58 ; K₂O : 4,18 ; TiO₂ : 0,68 ; P₂O₅ : 0,07.

18. — SiO₂ : 65,10 ; Al₂O₃ : 17,70 ; Fe₂O₃ : 1,44 ; FeO : 1,27 ; MgO : 0,79 ; CaO : 2,32 ; Na₂O : 6,61 ; K₂O : 4,30 ; TiO₂ : 0,53 ; P₂O₅ : 0,06.

19. — SiO_2 : 60,10 ; Al_2O_3 : 17,96 ; Fe_2O_3 : 1,34 ; FeO : 1,53 ; MgO : 0,26 ; CaO : 2,20 ; Na_2O : 6,25 ; K_2O : 3,80 ; TiO_2 : 0,46 ; P_2O_5 : 0,05 ; P. F. : 5,62.

20. — SiO_2 : 63,97 ; Al_2O_3 : 19,11 ; Fe_2O_3 : 1,43 ; FeO : 1,63 ; MgO : 0,28 ; CaO : 2,34 ; Na_2O : 6,66 ; K_2O : 4,04 ; TiO_2 : 0,49 ; P_2O_5 : 0,05.

ANDESITES

21. — Laves de Pariou (A. Durtol). — SiO_2 : 54,62 ; Al_2O_3 : 18,73 ; Fe_2O_3 : 10,09 ; MgO : 2,68 ; CaO : 7,31 ; Na_2O : 2,91 ; K_2O : 3,02. Densité : 2,85 (von Lansaulx).

21. — A Fontmort. — SiO_2 : 57,51 ; Al_2O_3 : 16,83 ; Fe_2O_3 : Densité ; 2,69 (von Lasaulx).

10,40 ; MgO : 1,89 ; CaO : 6,54 ; Na_2O : 3,86 ; K_2O : 2,21.

22. — Sans indication précise. — SiO_2 : 56,80 ; Al_2O_3 : 15,22 ; Fe_2O_3 : 10,96 ; MgO : 2,67 ; CaO : 6,43 ; Na_2O : 3,75 ; K_2O : 3,68 (par Rammelsberg).

23. — Chez Vasson. — SiO_2 : 55,45 ; Al_2O_3 : 18,10 ; Fe_2O_3 : 6,22 ; FeO : 1,52 ; MgO : 1,94 ; CaO : 5,92 ; Na_2O : 4,78 ; K_2O : 3,01 ; TiO_2 : 1,29 (Pisani).

24. — Fontaine du Berger. — SiO_2 : 54,55 ; Al_2O_3 : 18,10 ; Fe_2O_3 : 5,70 ; FeO : 2,07 ; MgO : 2,10 ; CaO : 5,65 ; Na_2O : 5,01 ; K_2O : 3,63 ; TiO_2 : 1,58 (Pisani).

25. — Laves de Nugère-Volvic. — SiO_2 : 62,04 ; Al_2O_3 : 20,13 ; Fe_2O_3 : 1,84 ; FeO : 3,47 ; MgO : 0,52 ; CaO : 4,17 ; Na_2O : 5,47 ; K_2O : 2,69. Densité : 2,73 (Kosmann).

26. — SiO_2 : 58,30 ; Al_2O_3 : 24,30 ; Fe_2O_3 : 3,80 ; MgO : 1,70 ; CaO : 3,90 ; Na_2O : 4,30 ; K_2O : 3,70. Densité : 2,685 (Sainte-Claire-Deville).

27. — SiO_2 : 61,92 ; Al_2O_3 : 19,51 ; Fe_2O_3 : 5,01 ; MgO : 1,20 ; CaO : 4,28 ; Na_2O : 5,63 ; K_2O : 2,51 ; Densité : 2,718 (von Lasaulx).

28. — Laves de Bleymas (andési-labradorite à Sayat). — SiO_2 : 57,90 ; Al_2O_3 : 19,10 ; Fe_2O_3 : 2,00 ; FeO : 4,59 ; MgO : 1,66 ; CaO : 4,20 ; Na_2O : 4,72 ; K_2O : 2,80 ; TiO_2 : 1,45 (Pisani).

LABRADORITES ET LABRADORITES-BASALTES

29. — Laves de Barme. Après le point 960. — SiO_2 : 47,50 ; TiO_2 : 3,60 ; Al_2O_3 : 17,61 ; Fe_2O_3 : 5,30 ; FeO : 5,50 ; MgO : 5,30 ; CaO : 8,95 ; K_2O : 2,18 ; Na_2O : 3,41 (par Pisani).

30. — Près de Bramaud. — SiO_2 : 50,50 ; TiO_2 : 2,42 ; Al_2O_3 : 20,00 ; Fe_2O_3 : 5,50 ; FeO : 3,74 ; MgO : 3,52 ; CaO : 7,29 ; K_2O : 2,48 ; Na_2O : 4,71 ; P_2O_5 : 0,83 (Pisani).

31. — Entre Pont-des-Eaux et les Quatre-Routes. — SiO_2 : 51,25 ; TiO_2 : 2,04 ; Al_2O_3 : 18,30 ; Fe_2O_3 : 5,20 ; FeO : 4,50 ; MgO : 3,90 ; CaO : 8,55 ; K_2O : 1,65 ; Na_2O : 3,58 ; P_2O_5 : 0,38 (Pisani).

32. — A Monteribeyre. — SiO_2 : 49,40 ; TiO_2 : 2,85 ; Al_2O_3 : 19,80 ; Fe_2O_3 : 3,60 ; FeO : 6,31 ; MgO : 3,47 ; CaO : 7,31 ; K_2O : 1,87 ; Na_2O : 4,96 (Pisani).

33. — A Olby. — SiO_2 : 48,45 ; TiO_2 : 2,75 ; Al_2O_3 : 17,84 ; Fe_2O_3 : 2,50 ; FeO : 8,20 ; MgO : 5,63 ; CaO : 8,64 ; K_2O : 1,37 ; Na_2O : 3,47 ; P_2O_5 : 0,39 (Pisani).

34. — Laves de Côte. Sans indications spéciale. — SiO_2 : 53,81 ; Al_2O_3 : 19,29 ; Fe_2O_3 : 2,11 ; FeO : 7,31 ; MgO : 3,24 ; CaO : 3,58 ; K_2O : 1,95 ; Na_2O : 4,55 ; P_2O_5 : 0,68. Densité : 2,89 (par Kolmann).

35. — A Ceyssat (puy Filhou). — SiO_2 : 47,75 ; TiO_2 : 3,35 ; Al_2O_3 : 18,60 ; Fe_2O_3 : 3,65 ; FeO : 7,47 ; MgO : 5,05 ; CaO : 7,60 ; K_2O : 1,76 ; Na_2O : 3,50 ; P_2O_5 : 0,75 (Pisani).

36. — Laves de Louchadière. Sans indication spéciale. — SiO_2 : 55,21 ; Al_2O_3 : 18,74 ; FeO : 8,34 ; MgO : 2,98 ; CaO : 6,01 ; K_2O : 2,97 ; Na_2O : 5,81 ; Densité : 2,81 (par von Lasaulx).

37. — Laves de Bleymas. A Argnat. — SiO_2 : 48,25 ; TiO_2 : 2,35 ; Al_2O_3 : 17,70 ; Fe_2O_3 : 3,00 ; FeO : 7,47 ; MgO : 6,40 ; CaO : 9,40 ; K_2O : 1,09 ; Na_2O : 2,43 (Pisani).

BASALTES

38. — Laves du Petit Puy-de-Dôme. Coulée à Fontanas. — SiO_2 : 50,28 ; Al_2O_3 : 22,21 ; FeO : 9,37 ; MgO : 4,46 ; CaO : 8,96 ; K_2O : 1,20 ; Na_2O : 3,98. Densité : 2,88 (analyse de von Lasaulx).

39. — Id. — SiO_2 : 50,31 ; Al_2O_3 : 22,95 ; FeO : 9,60 ; MgO : 5,29 ; CaO : 8,19 ; K_2O : 1,00 ; Na_2O : 4,30 (A. de Kosmann).

40. — Coulée à Royat. — SiO_2 : 48,57 ; Al_2O_3 : 19,47 ; FeO : 13,53 ; MgO : 4,25 ; CaO : 10,86 ; K_2O : 0,82 ; Na_2O : 0,82 ; Na_2O : 1,33. Densité : 2,79 (von Lasaulx).

41. — Laves du Puy-de-Dôme. Coulée à l'ouest du Puy-de-Dôme. — SiO_2 : 50,80 ; TiO_2 : 2,42 ; Al_2O_3 : 18,80 ; Fe_2O_3 : 3,10 ; FeO : 7,20 ; MgO : 4,45 ; CaO : 7,50 ; K_2O : 1,65 ; Na_2O : 3,90 ; P_2O_5 : 0,19 (A. de Pisani).

42. — Laves de Louchadière. Lave du cratère. — SiO_2 : 49,61 ; Al_2O_3 : 19,52 ; FeO : 11,02 ; MgO : 4,20 ; CaO : 10,53 ; K_2O : 1,91 ; Na_2O : 2,51. Densité : 2,97 (von Lasaulx).

43. — Laves de Besace. Coulée à Allagnat. — SiO_2 : 52,31 ; Al_2O_3 : 17,83 ; Fe_2O_3 : 13,63 ; MgO : 3,68 ; CaO : 6,11 ; K_2O : 2,46 ; Na_2O : 3,41. Densité : 2,82 (von Lasaulx).

44. Laves de Côme. Coulée sous la labradorite de Côme (Pontgibaud). — SiO_2 : 49,98 ; Al_2O_3 : 20,41 ; FeO : 11,28 ; MgO : 3,71 ; CaO : 9,53 ; K_2O : 1,68 ; Na_2O : 2,81. Densité : 2,91 (von Lasaulx).

45. — Laves de Nugère. Deuxième coulée de la Nugère (Puits Legay-chevalier). — SiO_2 : 48,75 ; TiO_2 : 3,17 ; Al_2O_3 : 16,90 ; Fe_2O_3 : 3,50 ; FeO : 7,74 ; MgO : 5,60 ; CaO : 8,45 ; K_2O : 1,77 ; Na_2O : 3,37 ; P_2O_5 : 0,26 (A. de Pisani).

46. — Laves de Gravenoire. — SiO_2 : 49,57 ; Al_2O_3 : 19,77 ; FeO : 11,36 ; MgO : 4,31 ; CaO : 10,71 ; K_2O : 1,28 ; Na_2O : 2,26. Densité : 2,49 (von Lasaulx).

BASALTES LIMBURGITIQUES ET LIMBURGITES

47. — Laves de Banson. Coulée des Rioux. — SiO_2 : 49,70 ; TiO_2 : 4,82 ; Al_2O_3 : 16,40 ; Fe_2O_3 : 3,40 ; FeO : 7,47 ; MgO : 7,78 ; CaO : 5,30 ; K_2O : 1,20 ; Na_2O : 3,10 (analyse de Pisani).

48. — Coulée de Say. — SiO_2 : 44,50 ; TiO_2 : 3,40 ; Al_2O_3 : 14,80 ; Fe_2O_3 : 4,50 ; FeO : 7,47 ; MgO : 7,88 ; CaO : 12,30 ; K_2O : 1,26 ; Na_2O : 3,40 (Pisani).

49. — Laves de la Vialle. Coulée de Madras. — SiO_2 : 43,75 ; TiO_2 : 3,90 ; Al_2O_3 : 16,40 ; Fe_2O_3 : 5,90 ; FeO : 7,75 ; MgO :

5,45 ; CaO : 9,80 ; K₂O : 1,45 ; Na₂O : 2,72 ; P₂O₅ : 0,19 (A. de Pisani).

50. — Laves de Côme. Deuxième coulée de Côme (Puits Michelin). — SiO₂ : 46,70 ; TiO₂ : 2,82 ; Al₂O₃ : 15,95 ; Fe₂O₃ : 1,90 ; FeO : 9,45 ; MgO : 7,90 ; CaO : 9,95 ; K₂O : 0,99 ; Na₂O : 2,76 (Pisani).

51. — Première coulée de Côme (Puits Michelin). — SiO₂ : 47,50 ; TiO₂ : 3,25 ; Al₂O₃ : 15,60 ; Fe₂O₃ : 2,25 ; FeO : 9,21 ; MgO : 7,04 ; CaO : 9,65 ; K₂O : 1,46 ; Na₂O : 2,75 (Pisani).

III. Un balsate recueilli par nous dans la montagne d'Uzore nous a donné les résultats suivants aux diverses analyses :

1° Examen microscopique : Balsate microlithique, typique, riche en phénocristaux d'augite et d'olivine, microlites de labrador, magnétite en petits grains très divisés

Cristaux d'olivine présentant sur les bords, le long des craquelures, l'altération ferrugineuse.

2° L'analyse chimique nous a donné les résultats suivants :

SiO ₂	46,8 %	MgO	2,117 %
SO ₄	3,95 %	K +	5,15 %
Cl	Traces	Na +	1,09 %
Al ₂ O ₃	24,77 %	Li	Néant.
Fe ₂ O ₃	1,03 %	H ₂ O	0,94 %
CaO	13,56 %		

Conciusion du chapitre V

Des épanchements basaltiques se sont fait jour au travers des formations tertiaires. Elles peuvent créer des voies de cheminement pour les eaux à leur surface de contact avec des terrains de résistance différente. Pendant ce trajet des dissolutions peuvent se réaliser. L'entraînement d'après l'analyse que nous rapportons, paraît pouvoir se faire surtout pour le calcaire. Ces basaltes paraissent assez pauvres en magnésium.

CHAPITRE VI

ETUDE DES FAILLES

Nous avons vu qu'il existe deux failles principales, une dans chacun des bassins que nous étudions, celle du bassin de Roanne, à l'Ouest, celle du bassin de Montbrison, à l'Est. A cause de leur rôle dans le cheminement des eaux, ces failles ont une certaine importance. Elles en acquièrent une plus grande encore si l'on pense qu'elles sont à l'origine des venues gazeuses profondes, pour ces deux raisons nous les décrirons assez complètement.

Les failles du Forez

Les failles du Forez. — Le Verrier les décrit ainsi :

Faille limite du bassin tertiaire. — Nous avons vu plus haut que les quatre zones tertiaires formaient des ellipses tronquées du côté Est ; elles sont toutes interrompues de ce côté par une ligne à peu près droite qui limite les terrains anciens ; le long de cette ligne, les quatre étages tertiaires touchent indifféremment le granite. Cette disposition fait présumer que le contact doit avoir lieu par faille, et rien n'indique de ce côté un relèvement des terrains inférieurs analogue à celui qui s'observe sur toute la bordure occidentale.

Relèvement du tertiaire autour des Montagnes du Forez. — Cette disposition est tout à fait symétrique de celle que l'on reconnaît dans le petit bassin d'Ambert.

de l'autre côté des montagnes du Forez ; les arkoses qui remplissent ce bassin se relèvent à l'Est sur les contreforts de la montagne jusqu'à la hauteur de 650 mètres environ. Dans cette région on voit des poudingues à gros éléments qui indiquent bien qu'on a affaire à la base du terrain

Les strates inclinent vers l'Ouest, et là, le bassin se termine par une ligne à peu près droite, le long de laquelle les grès viennent butter contre le granite, à la cote de 530.

Les arkoses de la Limagne sont également relevées à l'Est sur les flancs des montagnes du Forez ; il est donc naturel de considérer cette chaîne comme un soulèvement postérieur aux dépôts des bassins tertiaires, qui ont été relevés en sens inverse sur les deux flancs.

La coupe ci-contre exprime ces rapports.

La faille qui limite le bassin à l'Est et qui met en contact le granite avec l'étage supérieur du côté de Feurs doit avoir un rejet au moins égal à l'épaisseur du terrain tertiaire, et par conséquent supérieur à 500 mètres.

Cette faille a divisé le bassin tertiaire en deux parties ; l'une à l'Ouest, est celle qui se voit encore dans la plaine. le segment situé à l'Est et qui manque aujourd'hui s'est trouvé soulevé à plus de 500 mètres de son niveau primitif et a été enlevé par érosion. Ce sont probablement ses débris qui ont formé ces puissantes alluvions qui couvrent la rive droite de la Loire.

Débris de la partie soulevée du bassin. — On retrouve encore quelques témoins de cette partie disparue du dépôt tertiaire ; ainsi les lambeaux de grès que nous avons

signalés derrière le château de Soleillant et à St-Galmier paraissent isolés au milieu du granite et sont sans doute des débris relevés, par la faille limite qui ont échappé à l'érosion.

Ou trouve aussi en pleine montagne, sur toute la bordure Est du Forez, de nombreuses poches d'argiles dans le granite, lesquelles sont exploitées pour tuileries (au Sud de Janceney dans la vallée de la Coise, au Nord-Est de St-Galmier sur l'ancienne route de Chazelles, à mi-chemin sur la nouvelle route de Pouilly-les-Feurs à Bussières, près de Claveaux, en face de Saint-Marcel-de-Félines, etc.).

Ces différents dépôts d'argile peuvent être de formation quaternaire. cependant, d'après leur cote moyenne, qui ne dépasse guère 500 mètres, si l'on remarque surtout que les dépôts de cette nature paraissent à peu près absents de l'autre côté de la plaine sur les montagnes du Forez, au-dessus de la limite du tertiaire, on sera tenté de voir dans plusieurs d'entre eux les témoins plus ou moins remaniés de la partie de l'étage inférieur qui a été soulevée sur la lèvre orientale de la faille.

Indices d'autres failles. — La faille limite que nous venons d'étudier n'est pas seule qui affecte le terrain tertiaire ; il existe de nombreux indices de faille dans la plaine. Ainsi M. Mortier a déjà signalé l'aspect brouillé des terrains près de Montrond. A Cuzieu, les grès qui supportent ce village dominant d'une hauteur de 25 mètres environ l'étage sablonneux qui affleure au nord de la Coise ; la superposition de ce dernier au grès ne peut guère s'expliquer sans faille. Le passage d'une faille près de

Montrond est rendu très vraisemblable par les résultats du forage récemment entrepris pour recouper une des premières nappes aquifères rencontrées par le premier sondage : on n'a pas retrouvé cette nappe, quoiqu'on se soit placé à cinquante mètres de distance seulement et qu'on ait pénétré à une profondeur bien supérieure.

celle où elle devait se trouver.

Dans la région située entre Saint-Rambert et Montbri-son, la limite des deux étages inférieurs suit une ligne brisée qui semble indiquer qu'elle a été rejetée plusieurs fois par une série de failles parallèles. Une brisure analogue s'observe au milieu de la grande faille limite à l'Est du bassin ; cette bordure Est se compose de deux grands alignements rectilignes allant, l'un de Pouilly-les-Feurs à Valeilles, l'autre de Saint-Cyr-les-Vignes à Saint-Bonnet-les-Oules ; ces deux alignements, dirigés Nord-Nord-Ouest, sont coupés au Nord de Saint-Cyr-les-Vignes par un tronçon dirigé Nord-Est, qui semble un rejet produit par un accident qui a croisé la grande faille.

L'existence d'une faille au pied de la falaise très rectiligne qui s'étend de Vervieux à Cleppé, paraît également probable ; car, vu leur pente faible, les bancs de grès de cette falaise devraient se retrouver sur l'autre rive de la Loire. En outre, cette falaise est dans une situation topographique anormale, sur la rive gauche du fleuve et du côté de sa concavité. Cette particularité s'explique si la falaise doit son existence à une faille plutôt qu'à l'érosion.

La faille en question serait dirigée N.15° O. et se placerait dans le prolongement du grand défilé de la Loire.

Filonnets calcaires dans la butte de Gouttelas. — Au Nord de Marcoux, sur le chemin de ce village à Boën, on peut observer des faits qui démontrent presque péremptoirement que le jeu des grandes failles s'est prolongé jusqu'après le dépôt du tertiaire.

Une butte de basalte (près de Gouttelas) est coupée par des filonnets calcaires : ces filons se suivent plus loin dans le tertiaire ; ils longent de près la limite du terrain primitif et sont comme elles parallèles à la grande faille du Forez. Ils sont l'indice d'une fracture subordonnée à cette faille, qui a affecté le basalte et traversé le terrain miocène. Ces calcaires ressemblent à des travertins et doivent probablement leur origine à la circulation d'eaux minérales.

Plusieurs des points que je viens de signaler se trouvent sur le prolongement de failles qu'on peut suivre nettement dans les terrains anciens : il est très probable qu'elles se continuent dans le tertiaire, où la rareté des coupes et la présence des alluvions ne permet plus de les tracer avec précision.

Dans la Notice de la Carte de Montbrison, cette faille est décrite ainsi :

Failles et filons. — On peut distinguer trois directions principales de fracture : 1° la direction N. 40 à 60° E., suivies par de nombreux filons de granulite ; 2° la direction N. 15° O., suivie par presque tous les grands filons porphyriques ; 3° la direction N. 45° O., suivie par de nombreux filons de quartz triasique. A cette dernière appartient le plus grand accident géologique de la région, la faille du Forez, qui sépare la chaîne granitique des

terrains paléozoïques, elle est suivie par un filon de quartz, parfois avec galène et pyrite d'où sortent, à son croisement avec un faisceau de fractures N.-E., les eaux minérales de Sail-sous-Couzan. Celles de Saint-Galmier sont dans une situation analogue sur un filon de quartz parallèle, et à peu près sur le prolongement des buttes de basalte s'échelonnant aussi sur les fractures de ce système, ment avec un faisceau de fractures N.-E., les eaux minérales s'accompagnent d'eau minérale à Saint-Romain et à Montbrond. Un autre faisceau de filons de quartz longe le versant occidental de la chaîne du Forez, il est en relation avec de nombreuses sources minérales et avec des gisements de pyrite, notamment à Gumières où on a exploité le cuivre.

Les mouvements qui ont déterminé le relief actuel ont certainement eu lieu après le dépôt du miocène ; ils paraissent avoir souvent rouvert les fractures anciennes. Ce phénomène est mis en évidence par l'association des filons de quartz triasique avec les sources minérales actuelles et les éruptions basaltiques. Les failles qui limitent les bassins tertiaires sont alignées N.-N.O. et parfois en relation avec des eaux minérales, à Salt-en-Donzy, dans le Forez, et tout le long de la limite du bassin d'Ambert.

Les failles du Roannais

Les failles du Roannais. — Le Verrier les décrit ainsi :

Faille limitant le bassin à l'Ouest. — Les assises oligocènes forment un bassin elliptique tronqué vers l'Ouest, où elles viennent buter par faille contre une falaise granitique, à peu près rectiligne.

C'est une disposition analogue à celle du bassin du Forez, mais la pente est en sens inverse, la faille qui limite le tertiaire du Forez se trouvant à l'Est de la plaine.

Au pied de cette falaise, le terrain est couvert d'éboulis à gros fragments anguleux de granite, et surtout de porphyre. Ces fragments sont souvent empâtés dans une argile analogue à celle du niveau tongrien, que ces éboulis recouvrent en partie ; comme ce niveau contient lui-même des cailloutis à éléments analogues, il est souvent difficile de savoir à quel âge il faut rapporter ces argiles caillouteuses.

Toutefois comme la faille est certainement très postérieure à l'oligocène, que sur une partie de son parcours (à la Pacaudière) elle entame le niveau marneux qui par ailleurs repose sur des grès feldspathiques fins, il n'y a certainement aucune raison pour que le tongrien ait pris, tout le long de cette ligne, ce faciès bréchoïde. Je pense donc qu'il convient de rapporter à des éboulis récents, tous les dépôts caillouteux qui ne sont pas bien stratifiés. L'argile peut y provenir de remaniement du tongrien, dont la partie occidentale surélevée par le jeu de la faille a été complètement détruite par les érosions.

La feuille de Roanne en donne la description suivante :

La plus intéressante des failles est celle du Forez, qui limite à l'Ouest les bassins carbonifères. Elle est jalonnée sur tout son parcours par des filons de quartz et accompagnée d'un faisceau de fractures parallèles et transversales, souvent minéralisées. A ce faisceau appartiennent les filons de plomb de Juré, de la Chambodut, et plusieurs petits filons reconnus de Saint-Just. A partir de Saint-

Priest, le prolongement direct de la faille du Forez passe à la Prugne, puis à Saint-Clément, et se perd dans le granite. Les amas de cuivre panaché de Charrier se trouvent dans un étoilement de fractures appartenant à ce faisceau ; on rencontre des gisements de plomb à Golhard, sur un filon transversal, et à Ramillard le long de la faille principale. Cette branche de la faille ne forme plus la limite occidentale des bassins carbonifères ; la zone d'affaissement maximum se trouve entre elle et une autre faille parallèle située plus à l'ouest, qui limite le bassin de Ferrières et se rattache à la première par une série de fractures transversales, allant de la Guillermie à la Prugne. Au point de vue stratigraphique, c'est cette seconde faille qui constitue dans l'Allier le prolongement infléchi de celle du Forez.

La faille de la côte, qui limite le bassin tertiaire, est jalonnée par une série de sources minérales qui sortent des terrains anciens ou du granite, tout près de la limite (sources bicarbonatées de Saint-Alban et Renaison, source silicatée de Sail-les-Bains).

CHAPITRE VI

ANALYSE CHIMIQUE DES EAUX

Les eaux minérales bicarbonatées viennent au jour par de nombreux points dans la région que nous venons d'étudier. Leurs analyses se trouvent dans le livre de JACQUOT et WILLM, mais il s'agit de documents déjà anciens. Nous avons demandé aux différentes stations de nous communiquer des analyses plus récentes qui pourraient être en leur possession ; ce sont ces différents documents chimiques recalculés en ions que nous rapportons ici.

RENAISON

Un litre d'eau contient :

1° CATIONS		2° ANIONS	
K+	0,066		
Na+	0,085		
Li+	non étudié	SO ³	0,020
NH ⁴ +	non étudié	NO ³	traces
Ca++	0,159	NO ²	non étudié
Sr++	non étudié	Cl	0,103
Mg++	0,0216	F	non étudié
Fe++	0,009	CO ³	0,30
	} 0,009	AsO ³ H	non étudié
Mn++		PO ⁴ H	non étudié
Al +++	non étudié	Silicates alcalins	0,200
Ra++	non étudié		

Total des cations et des anions..... 0,9636

SAIL-LES-BAINS

	Source, Romaine (25°)	Source du Hamel (34°)	Source Urfe	Source Persigny	Source dite Sulfureuse	Source Bellkey
Débit	24.500 lit.	1.150.000 lit.				
Radioactivité :						
en mm. c. : eau	67,09	11,47				
gaz	214,1	46,8				
Un litre d'eau contient :						
1° CATIONS						
K+	0,0017	0,0015	0,0013	0,00015	0,0019	traces
Na+	0,104	0,0907	0,0925	0,9456	0,1220	0,0290
Li+	Néant	0,100	Néant	Néant	Néant	Néant
NH ⁴ +	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié
Ca++	0,0112	0,0121	0,0116	0,0109	0,0125	0,0099
Sr++	Néant	Néant	Néant	Néant	Néant	Néant
Mg++	0,0000668	0,0007	0,0005	0,00055	0,0007	0,0004
Fe++	0,0007	0,00086	0,00114	0,0007	0,0008	traces
Mn++	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié
Al+++	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié
Ra++	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié
2° ANIONS						
SO ⁴ —	0,0140	0,345	0,00157	0,343	0,0154	0,0059
NO ³ —	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié
NO ² —	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié
Cl—	0,0296	0,0285	0,0284	0,0283	0,0297	0,00195
F—	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié
CO ³ H—	0,1382	0,9127	0,136	0,1343	0,1364	0,0436
AsO ⁴ H—	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié
PO ⁴ H—	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié	non étudié
Total des cations						
et des anions . . .	0,2994668	1,49206	0,29714	1,46505	0,3194	0,1083
3° ACIDES NON DIS-						
SOCIES						
SiO ²	0,0103	0,0106	0,0117	0,0106	0,0114	0,0047
CO ²	0,0224	0,023	0,0228	0,0213	0,0255	0,0122
Minéralisation totale .	0,3321668	1,52566	0,33164	1,49695	0,3563	0,1252

SAINT-GALMIER, BADOIT (14°)

Un litre d'eau contient :

1° CATIONS		2° ANIONS	
K+	non étudié		
Na+	0,0511	SO ³ — —	0,0487
Li+	non étudié	NO ³ —	0,020
NH ⁴ +	non étudié	NO ² —	0
Ca++	0,2816	Cl —	0,0789
Sr++	non étudié	F —	non étudié
Mg++	0,2206	CO ³ H —	1,052
Fe++	0,0035	AsO ⁴ H — —	non étudié
Mn++	traces	PO ⁴ H — —	0
Al+++	non étudié		
Ra++	non étudié		

Total des cations et des anions..... 1,7564

3° ACIDES NON DISSOCIES :

SiO ²	0,039
CO ²	1,4820
B ² O ³	non étudié

Minéralisation totale 3,2774

4° RESIDU à 110°..... 1,5420

RESIDU après calcination..... 1,2420

RESIDU au rouge..... 0,300

5° EVALUATION DE LA MATIERE ORGANIQUE :

1° en oxygène	{ Sol. acide	1,375
	{ Sol. alcaline ...	1,375
2° en acide oxalyque	{ Sol. acide	10,835
	{ Sol. alcaline ...	10,835

MONTBRISON - MOINGT

	Source Romaine	Source de l'Hôpital	Source de la Rivière
--	-------------------	------------------------	-------------------------

Un litre d'eau contient :

1° CATIONS

K+	non étudié	non étudié	non étudié
Na+	1,068	1,264	0,947
Li+	non étudié	non étudié	non étudié
NH ⁴ +	non étudié	non étudié	non étudié
Ca++	0,1688	0,136	0,130
Sr++	non étudié	non étudié	non étudié
Mg++	0,059	0,043	0,043
Fe++	0,047	0,017	0,036
Mn++	non étudié	non étudié	non étudié
Al +++	non étudié	non étudié	non étudié
Ra++	non étudié	non étudié	non étudié

2° ANIONS

SO ⁴ —	non étudié	non étudié	non étudié
NO ³ . —	non étudié	non étudié	non étudié
NO ² —	non étudié	non étudié	non étudié
Cl —	0,118	0,106	0,106
F —	non étudié	non étudié	non étudié
CO ³ H —	1,778	non étudié	non étudié
AsO ⁴ H — —	non étudié	non étudié	non étudié
PO ⁴ H — —	non étudié	non étudié	non étudié

Total des cations

et des anions.	3,238	1,566	1,262
----------------	-------	-------	-------

3° ACIDES NON

DISSOCIES :

SiO ³	0,0514	0,0986	0,0578
----------------------------	--------	--------	--------

Minéralisat. totale.	3,2894	1,6646	1,3198
----------------------	--------	--------	--------

Matières organiques	0,050	0,085	0,035
---------------------	-------	-------	-------

SAINT-ROMAIN-LE-PUY

Un litre d'eau contient :

1° CATIONS		2° ANIONS	
K+	0,098		
Na+	1,040		
Li+	non étudié	SO ⁴ —	0,010
NH ⁴ +	non étudié	NO ³	non étudié
Ca ² +	0,116	NO ² —	non étudié
Sr++	non étudié	Cl—	0,105
Mg++	0,079	F—	non étudié
Fe++	0,043	CO ³ H—	1,635
Mn++	non étudié	AsO ⁴ H—	non étudié
Al+++	} 0,066	PO ⁴ H—	non étudié
Si++			
Ra++	non étudié		
Total des cations et des anions.....		3,1533	
3° ACIDES NON DISSOCIES :			
SiO ²			non étudié
CO ² libre			2,701
Minéralisation totale		5,8533	

SAIL-SOUS-COUZAN

Un litre d'eau contient :

	Source Rimaud	Source Fontfort
1° CATIONS		
K+	0,0121	0,0924
Na+	0,672	0,184
Li++	traces	traces
NH ⁴ +	traces	traces
Ca++	0,092	0,1414
Sr++	traces	traces
Mg++	0,0549	0,0497
Fe++	0,0045	0,002
Ml++	traces	traces
Al+++	traces	traces
Ra++	traces	traces
2° ANIONS		
SO ⁴ —	non étudié	non étudié
NO ³ —	non étudié	non étudié
NO ² —	non étudié	non étudié
Cl —	non étudié	non étudié
F —	non étudié	non étudié
CO ³ H —	non étudié	0,701
As ⁴ H —	non étudié	non étudié
PO ⁴ H —	non étudié	non étudié
Total des anions et des cations	0,8355	1,2705
3° ACIDES NON DISSOCIES		
SiO ²	0,0878	0,0642
Minéralisation totale	0,9228	1,3347
GAZ LIBRES EN DISSOLUTION		
CO ²	219 cc.	392 cc.

EAU DE COUZAN (Source Brault)

Un litre d'eau contient :

1° CATIONS		2° ANIONS	
K+	0,1182	SO ⁴ — —	0,0022
Na+	2,362	NO ³ —	néant
Li+	0,0003	NO ² —	non étudié
NH ⁴ +	non étudié	Cl —	0,057
Ca++	0,08	F —	non étudié
Sr++	non étudié	CO ³ H —	0,411
Mg++	0,052	AsO ⁴ H —	0,00010
Fe++	0,007	PO ⁴ H — —	non étudié
Mn++	traces		
Al+++	non étudié		
Ra++	non étudié		
Total des anions et des cations.....			4,2658
3° ACIDES NON DISSOCIES :			
SiO ²			0,027
Minéralisation totale			4,2928
GAZ EN DISSOLUTION			
CO ²			11,018

SAINT-GALMIER-REMY

Un litre d'eau contient :

1° CATIONS		2° ANIONS	
K+	non étudié	SO ⁴ — —	0,37
Na+	0,040	NO ³ —	non étudié
Li+	non étudié	NO ² —	non étudié
NH ⁴ +	non étudié	Cl —	0,121
Ca++	non étudié	F —	non étudié
Sr++	non étudié	CO ³ H —	0,234
Mg++	0,148	AsO ⁴ H — —	non étudié
Fe++	(0,02	PO ⁴ H — —	non étudié
Al+++	(		
Mn++	non étudié		
Ra++	non étudié		

Total des cations et des anions..... 0,933

3° ACIDES NON DISSOCIES :

SiO ²	non étudié
CO ² libre	2,94
B ² O ³	non étudié

4° RESIDU INSOLUBLE 0,020

Minéralisation totale 4,073

EAU DE MONTROND (26°)
Débit 260.000 litres en 24 heures

Un litre d'eau contient :

1° CATIONS		2° ANIONS	
K+	non étudié	SO ³ — — . . .	non étudié
Na+	1,25	NO ³ —	non étudié
Li++	non étudié	NO ² —	non étudié
NH ⁴ +	non étudié	Cl —	non étudié
Ca++	0,019	F —	non étudié
Sr++	non étudié	CO ³ H —	2,146
Mg++	0,0099	AsO ⁴ H — — . .	non étudié
Fe++	0,0352	PO ⁴ H — — — .	non étudié
Mn++	non étudié		
Al+++	non étudié		
Ra++	non étudié		
Total des cations et anions.....		2,4601	
3° ACIDES NON DISSOCIES :			
SiO ²	0,09		
CO ²	3,18		
B ² O ³	non étudié		
Minéralisation totale		5,7301	

SAINT-ALBAN

Débit total des 4 sources : 160.000 litres

Un litre d'eau contient :

	Puits César ou Grand Puits 17°2 (bains)	Puits Faustine ou de la pompe (lotions) ou des dermatosiques	Puits Antonin ou nouveau puits rond ou puits neuf
1° CATIONS			
K +	0,0432	0,0442	0,0451
Na +	0,3692	0,3679	0,0451
Li +	non étudié	non étudié	non étudié
NH ⁴ +	non étudié	non étudié	non étudié
Ca + +	0,3651	0,3710	0,3695
Sr + +	non étudié	non étudié	non étudié
Mg + +	0,1430	0,1391	0,1422
Fe + +	0,0105	0,0104	0,0099
Mn + +	non étudié	non étudié	non étudié
Al + + +	non étudié	non étudié	non étudié
Ra + +	non étudié	non étudié	non étudié
2° ANIONS			
SO ⁴ — —	non étudié	non étudié	non étudié
NO ³ —	non étudié	non étudié	non étudié
Cl —	0,0189	0,0192	0,0190
F —	non étudié	non étudié	non étudié
CO ³ H —	3,39	3,3781	3,41
ASO ⁴ H — —	traces	traces	traces
PO ⁴ H — —	néant	néant	néant
Total des Cation et des anions..	4,3299	4,3299	4,3644
3° ACIDES NON DISSOCIES			
SiO ²	0,0453	0,0443	0,0448
Minéralisation totale	4,3752	4,3742	4,4092

ANALYSE DES EAUX DE FEURS

En 1937, Geslin, assistant de M. Lepape, a réalisé au Collège de France, l'analyse suivante :

Composition centésimale :

Anhydride carbonique	1,8	
Oxygène, faibles traces.....	<0,2	
Gaz combustibles	1,86	
Azote	93,61	
Argon (+ traces de Krypton et de Xénon)	0,980	} Gaz rares 2,573 %
Hélium (+ traces de Néon).....	1,598	
Krypton	0,00013	
Xénon	0,0000099	

CHAPITRE VIII

ORIGINE DES EAUX MINÉRALES BICARBONATÉES DES BASSINS DE ROANNE-MONTBRISON

Une vue d'ensemble a été donnée en 1899 par DE LAUNAY. Il s'agit d'un bref raccourci qui n'apporte malheureusement que peu de renseignements sur l'origine des eaux minérales bicarbonatées des bassins de Roanne et de Montbrison, d'ailleurs le voici :

Ainsi que nous avons déjà eu l'occasion de le dire précédemment, la bordure des bassins tertiaires de Montbrison et de Roanne se comporte, à l'égard des sources thermales, comme celle de la Limagne. On retrouve, de même, sur les fractures qui limitent ces effondrements, des sources bicarbonatées gazeuses, généralement utilisées comme eau de table.

Ainsi, à l'Ouest de Roanne, on a sur la bordure Est du massif granitique des Mont de la Madeleine, du Nord au Sud : Sail-les-Bains, à peu de distance du pointement basaltique tout à fait isolé d'Andelaroche, Renaison et Saint-Alban.

Le bassin tertiaire de Montbrison, qui forme le prolongement direct de celui de Roanne, en est séparé par une traînée saillante de tufs orthopyriques du culm, qui s'avance là au milieu de l'effondrement de la Loire, avec une direction Est-Ouest, comme elle le fait, plus à

l'Ouest, à Saint-Yorre, à travers l'effondrement parallèle de la Limagne d'Allier.

Puis on a, toujours dans les mêmes conditions, au voisinage de pointements basaltiques de plus en plus multipliés : Sail-sous-Couzan, sur une petite fracture latérale dans les schistes précambriens, Montbrison, Saint-Romain sur la bordure Ouest ; Saint-Galmier et Salt-en-Donzy sur la bordure Est. Entre ces deux dernières, la source de Montrond, sur la rive droite de la Loire, vers le centre du bassin, a été obtenue par un sondage, à 475 mètres de profondeur, au voisinage d'un petit pointement basaltique, dissimulé sous la crête du château de Montrond. Elle est très chargée de gaz et paraît prouver qu'ici comme dans la région de Vichy, les filons hydrothermaux, alimentés par des mofettes d'acide carbonique en rapport avec les basaltes, donnent lieu à des épanchements latéraux, sous forme de nappes artésiennes minéralisées.

CONCLUSIONS - OPINION PERSONNELLE

Les différentes sources que nous avons citées forment bien une unité naturelle, elles se caractérisent par le fait qu'elles rencontrent dans la profondeur des venues post-volcaniques. Pendant leur trajet, elles traversent des terrains anciens du type granitique, puis enfin un certain nombre d'entre elles terminent leur trajet après un parcours relativement prolongé à travers des marnes plus ou moins riches en calcaires.

Il fut longtemps classique d'opposer des sources du type profond, juvéniles, à des sources du type superficiel,

il semble bien que dans un grand nombre de cas, cette classification soit artificielle et qu'il vaille mieux se poser la question des origines de l'eau, d'une part, des éléments de la minéralisation, d'autre part, en les envisageant chacun séparément.

Dans le cas qui nous intéresse, nous croyons pouvoir conclure que :

1° L'eau de ces différentes sources doit être très souvent d'une origine mixte, parfois très largement d'origine profonde, c'est le cas, par exemple, de Montrond. D'autres fois, dans le cas des sources froides, d'origine à peu près complètement ou même complètement superficielle.

2° L'anhydride carbonique est constamment d'origine profonde, se faisant jour à travers les nombreuses failles de la région, tantôt entraînée avec des eaux profondes, tantôt se dégageant seule, comme dans une mofette et rencontrant sur son parcours des eaux d'origine superficielle.

3° La silice, le fer sont particulièrement élevés dans les eaux qui ont eu un contact prolongé avec les granites et les grès du Tongrien. Cependant le fer provient dans certains cas des couches pyriteuses des marnes tertiaires.

4° Enfin le calcium et le magnésium proviennent indubitablement des terrains tertiaires superficiels.

Il est bien difficile d'aller plus loin et de fixer dans chaque cas la part exacte qui revient à chaque terrain dans la minéralisation de chaque source, sans entrer dans des hypothèses vraiment trop prématurées.

CHAPITRE IX

ETUDE D'UNE BOUE DE MONTROND

De la boue recueillie dans la vasque de Montrond nous ayant été envoyée, nous avons pratiqué une analyse chimique qui est rapportée dans ce chapitre.

Il s'agit d'une boue rouge d'aspect ferrugineux. Nous avons pensé qu'il serait intéressant de comparer les résultats de son analyse chimique aux analyses de différentes boues ferrugineuses réalisées il y a deux ans par MM. PIÉRY, EN^oELME et JOURTAIN. Nous rapportons donc d'abord les résultats de ces analyses afin de permettre une comparaison plus facile.

ANALYSE CHIMIQUE DES BOUES

(par M. PIÉRY, J. ENSELME et R. JOURDAIN)

Salins chaud. — Fe : 36,34 ; Al_2O_3 : 15,76 ; Ca : 4,24 ; As : 4,60 ; Cl : 0,71 ; SiO_2 : 2,42 ; Mn : 0,010 ; SO_3 : 0,694 ; Mg : 0,419 ; CO_2 : 0,738 ; PO_4H : 0,001 ; B_2O_3 : O ; Fl : 0,108 ; N total : 0,154 ; N aminé : 0,000214 ; N ammoniacal : 0,045 ; Insol. ds HCl : 13,48. Perte au rouge : 7,2.

Salins froid. — Fe : 4,256 ; Al_2O_3 : 2,456 ; Ca : 6,72 ; As : 0,020 ; Cl : 0,426 ; SiO_2 : 66,104 ; Mn : 0,093 ; SO_3 : O ; Mg : 2,59 ; CO_2 : 0,531 ; PO_4H : 0 ; B_2O_3 : 0,009 ; Fl : 0,185 ; N total : 0,077 ; N aminé : 0 ; N ammoniacal : 0,028 ; Insol. ds HCl : 64,984. Perte au rouge : 1,616.

Brides. — Fe : 35,84 ; Al_2O_3 : 8,132 ; Ca : 3,86 ; As : 1,50 ; Cl : 0,270 ; SiO_2 : 14,23 ; Mn : O ; SO_3 : 0,7 ; Mg : 0,347 ;

CO² : 0,318 ; PO⁴H : 0,001 ; B²O³ : 0,168 ; Fl : 0,000189 ;
N total : 0,0086 ; N aminé : 0,154 ; N ammoniacal : 0,072 ;
Insol. ds HCl : 5,992. Perte au rouge : 13,38.

Echaillon : Fe : 9,408 ; Al²O³ : 9,28 ; Ca : 6,88 ; As : 0,40 ;
Cl : 0,044 ; SiO² : 58,016 ; Mn : 0 ; SO³ : 0,53 ; Mg : 0,787 ;
CO² : 3,293 ; PO⁴H : 0 ; B²O³ : 0 ; Fl : 0,242 ; N total : 0,189 ;
N aminé : 0 ; N ammoniacal : 0,068 ; Insol. ds HCl : 54,906.
Perte au rouge : 11,27.

Châtel Yvonne. — Fe : 28,224 ; Al²O³ : 8,56 ; Ca : 15,44 ;
As : 0,030 ; Cl : 0,290 ; SiO² : 0 ; Mn : 0,0055 ; SO³ : 0,132 ;
Mg : 0,005 ; CO² : 4,85 ; PO⁴H : 0,004 ; B²O³ : 0 ; Fl : 0,167 ;
N total : 0,119 ; N aminé : 0,00004 ; N ammoniacal : 0,072 ;
Insol. ds HCl : 0 ; Perte au rouge : 12,595.

Châtel-Louise. — Fe : 36,736 ; Al²O³ : 16,48 ; Ca : 5,04 ;
As : 0,048 ; Cl : 0,291 ; SiO² : 5,37 ; Mn : 0,0005 ; SO³ : 0,045 ;
Mg : 0,007 ; CO² : 0,227 ; PO⁴H : 0,007 ; B²O³ : 0 ; Fl : 0,160 ;
N total : 0,126 ; N aminé : 0,00005 ; N ammoniacal : 0,075 ;
Insol. ds HCl : 4,723. Perte au rouge : 11,10.

Bourboule Choussy : Fe : 11,984 ; Al²O³ : 9,60 ; Ca : 12,81 ;
As : 1,90 ; Cl : 0,014 ; SiO² : 39,01 ; Mn : 0 ; SO³ : 0,375 ;
Mg : 0,009 ; CO² : 5,91 ; PO⁴H : 0 ; B²O³ : 0 ; Fl : 0,027 ;
N total : 0,326 ; N aminé : 0,000150 ; N ammoniacal : 0,129 ;
Insol. ds HCl : 37,382 ; Perte au rouge : 13,820.

Bourboule Fenestre. — Fe : 48,38 ; Al²O³ : 5,40 ; Ca : 1,24 ;
As : 6,80 ; Cl : 0,005 ; SiO² : 11,375 ; Mn : 0 ; SO³ : 0 ;
Mg : 0,586 ; CO² : 0,455 ; PO⁴H : 0 ; B²O³ : 0 ; Fl : 0,047 ;
N total : 0,217 ; N aminé : 0,000138 ; N ammoniacal : 0,124 ;
Insol. ds HCl : 8,92. Perte au rouge : 6,074.

Vals. — Fe : 38,12 ; Al²O³ : 9,782 ; Ca : 5,12 ; As : 0,235 ;
Cl : 0 ; SiO² : 7,38 ; Mn : 0,008 ; SO³ : 0,274 ; Mg : 0,328 ;
CO² : 0,248 ; PO⁴H : 0,027 ; B²O³ : 0,006 ; Fl : 0,038 ; N total :
0,077 ; N aminé : 0,000112 ; N ammoniacal : 0,031 ; Insol.
ds HCl : 6,94. Perte au rouge : 9,154.

Charbonnières. — Fe : 40,70 ; Al²O³ : 24,24 ; Ca : 2,52 ;
As : 0,240 ; Cl : 0,018 ; SiO² : 4,88 ; Mn : 0 ; SO³ : 0,360 ;
Mg : 0,194 ; CO² : 0,704 ; PO⁴H : 0 ; B²O³ : 0 ; Fl : 0,770 ;
N total : 0,266 ; N aminé : 0,00007 ; N ammoniacal : 0,087 ;
Insol. ds HCl : 14,102. Perte au rouge : 9,43.

DEPOT RECUEILLI SUR LA VASQUE
DE LA SOURCE DE MONTROND

SiO ²	2,20 %	Mg	Traces
SO ⁴	3,40 %	K+	4,4 %
CO ²	0,68 %	Na+	1,35 %
Cl	1,50 %	Li	Néant
Al ² O ³	12,64 %	H ² O	1,45 %
Fe ² O ³	49,56 %	As	11,5 %
CaO	3,25 %	Mn	6 %

Conclusion. — On notera l'analogie de constitution entre cette boue et celle de Salins. Le teneur en arsenic est tout à fait remarquable.

TECHNIQUES

Nous avons, suivant la technique indiquée par TRADEWELL, opéré sur une double prise d'essai de 0 gr. 50 après dessiccation à 110° jusqu'à poids constant.

PREMIÈRE PRISE D'ESSAIS

1° *Dosage de la silice.* — Fusion avec carbonate de soude et carbonate de potasse à parties égales. Insolubilisation et double extraction par l'acide chlorhydrique. Calcination au creuset de platine et pesée à l'état de SiO_2 . Purification par FH et nouvelle pesée du creuset. La différence entre les deux pesées donne le poids de SiO_2 à l'état pur.

2° *Dosage des sulfates.* — Pondéralement à l'état de $\text{SO}_4 \text{ Ba}$.

3° *Dosage des chlorures.* — Par la méthode cyanométrique de DENIGES.

4° *Dosage du fer.* — Précipitation de l'aluminium et du fer par l'ammoniaque ; dissolution dans HCl et reprécipitation par NH_3 ; calcination des deux hydrates et pesée ; dissolution des oxydes dans l'acide sulfurique après chauffage avec le bisulfate de potasse ; titrage du fer par MnO^4K .

5° *Dosage de l'aluminium.* — Par différence après titrage du fer.

6° *Dosage du calcium.* — Soit à l'état d'oxalate de Ca que l'on calcine et pèse, soit à l'état d'oxalate de Ca que l'on titre manganométriquement. Les résultats sont sensiblement identiques.

7° *Dosage du magnésium, à l'état de Pyro-phosphate de magnésie.*

8° *Dosage de l'arsenic, à l'état de Pyro-arséniate de magnésie.*

DEUXIEME PRISE D'ESSAIS

1° *Potassium.* Méthode de Leulier et Griffon.

2° *Dosage du sodium.* Méthode de Blanchetière, à l'état d'acétate triple d'uranium, de sodium et de magnésium.

3° *Dosage du Li.* — A l'état de chlorure de Litium insoluble dans l'alcool amylique.

DOSAGE DE CO²

Dosage gazométrique du CO² recueilli sur la cuve à eau salée.

CONCLUSION

I. — Nous avons pensé pouvoir réunir en deux systèmes naturels les sources bicarbonatées du haut bassin de la Loire. Nous les avons groupées en deux aires d'émergence, l'une centrée par Roanne, l'autre par Montbrison et toutes deux en contact avec les ilots tertiaires qui caractérisent géologiquement ces régions.

II. — Nous avons discuté la nature possible des éléments d'origine profonde et nous sommes arrivés à cette conclusion que l'anhydride carbonique des eaux de ces bassins était d'origine profonde. L'eau elle-même reconnaissait partiellement dans certains cas une même origine.

III. — La silice nous est apparue liée à l'existence des granites profonds et des grès feldspathique du Tongrien.

IV. — Le fer nous a semblé apporter d'une part, par la décomposition des granites, d'autre part, par des faciès pyriteux intercalés dans les marnes aquitanniennes.

V. — Le calcium et le magnésium nous ont semblé devoir être attribués à des bancs calcaires intercalés dans les marnes aquitaniennes.

VI. — Le cheminement des eaux peut-être expliqué d'une part, par un système de failles assez complexe dont nous avons rapporté la description et d'autre part, dans certains cas, à des surfaces de contact entre des terrains d'une inégale résistance réalisée par des poussées basaltiques fréquentes dans cette région et souvent situées au contact des sources.

Le Président de la Thèse,
M. PIERY.

Vu :
Le Doyen,
Jean LÉPINE.

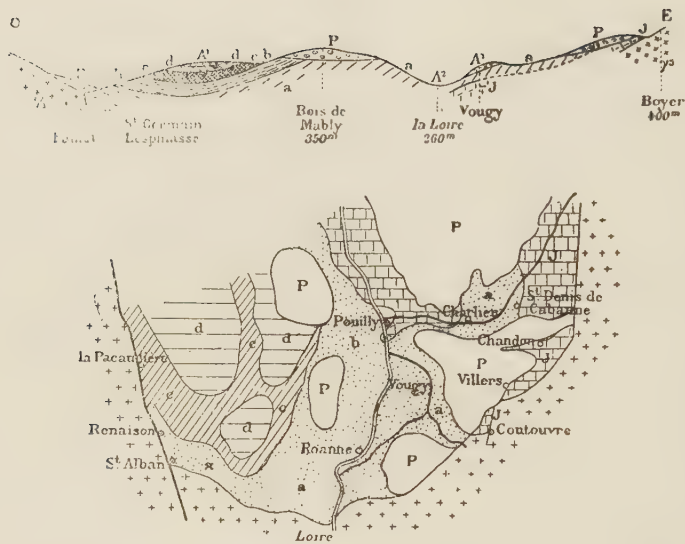
Vu et permis d'imprimer :
Lyon, le 17 juin 1939
Le Recteur, Président du Conseil de l'Université,
A. LIRONDELLE.



D'après LE VERRIER.

FIG. I

Blanc: Granite. — Traits pleins horizontaux: Gneiss. — Pointillés horizontaux: Tongrien. — Pointillés verticaux: Aquitanien. — Points noirs: Basalte. — Cercles centrés par un point: Buttes de pépérite. — Doubles traits: Failles et filons quartzeux. — Traits pleins rapprochés horizontaux, aux environs de Feurs: Marnes supérieures de l'Aquitaniens. — Traits verticaux à droite de la Loire: Grès et sables grossiers aquitaniens. — Pointillés à droite de la Loire: Sables fins aquitaniens. — Petites croix à droite de la Loire: Tongrien, partie argileuse.

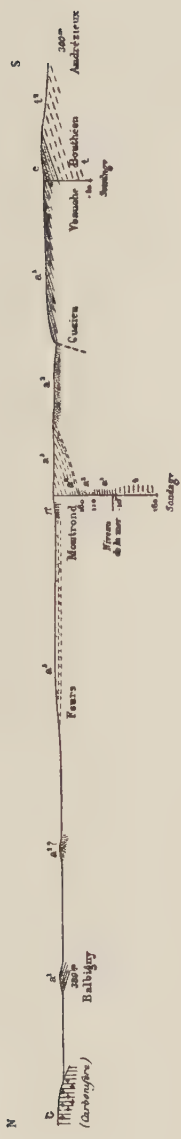


D'après LE VERRIER.

FIG. II

Aquitanien: d. Sables quartzeux, c. Calcaires et marnes.
 — Tongrien: b. argiles, a. sables et arkoses. — J. Ter-
 rains secondaires. — G. Granite et porphyre. — P.
 Pliocène? — A¹. Alluvions à galets quartzeux de pla-
 teaux, A². Alluvions anciennes de la vallée de la Loire,
 A³. Alluvions modernes. — E. Eboulis sur les pentes.

Coupe longitudinale suivant les berges de la Loire



Coupes transversales de la plaine du Forez



D'après LE VERRIER.

FIG. III

A², Alluvions actuelles, A¹ Alluvions anciennes. — P² Pierre à pisé.
 p¹ Cailloutis quartzeux. — Aquitanien, a³ Marnes vertes, a² Sables
 fins, a¹ Grès, c Calcaire. — Tongrien, t², Argile, t¹, Arkosc. — B.
 Basalte. — N, Pépérîte, G. Granite et terrains anciens,
 fins, a¹ Grès, c, Calcaire. — Tongrien, t², Argile, t¹, Arkose. — B.

TABLEAU DES AGES DE LA TERRE

Ere Tertiaire	Terrains Néogènes	Pléistocène	ou Quater -		{ supérieur
			naire		{ inférieur
		Pliocène	{ supérieur	{ Sicilien	
			{ moyen	{ Astien	
			{ inférieur	{ Plaisancien	
		Miocène	{ supérieur	{ Pontien	
				{ Sarmatien	
			{ moyen	{ Tortonien	
				{ Helvétien	
		Terrains Éogènes	Oligocène	{ inférieur	{ Burdigalien
	{ supérieur			{ Aquitanien	
	{ moyen			{ Stampien	
	Éocène		{ inférieur	{ Sannoisien ou Tongrien	
			{ supérieur	{ Ludien	
				{ Bartonien	
			{ moyen	{ Lutécien	
				{ Londinien	
{ inférieur			{ Sparnacien		
			{ Thanétien		
	{ Montien				

BIBLIOGRAPHIE

- BERGEAT (A.). — Les îles éoliennes (*Abhandl. Math. phys. Classe, K., bayer, Acad.*, 1889, 20 - 193).
- FOUQUE (F.). — Sur la composition du gaz dégagé dans la dernière éruption des Açores (*Compt. Rend. Ac. Sciences*, 1868, 66, 915).
- FOUQUE (F.). — Santorin et ses éruptions (*Paris*, 1879).
- GAUTIER (A.). — Le fluor est un élément constant des émanations du noyau terrestre (*Compt. Rend. Ac. Sciences*, 1913, 157, 820).
- GORGEIX (H.). — Etude du Vésuve et dégagements gazeux des champs phlégréens au mois de juin 1869. Etude des dégagements gazeux du Santorin pendant la fin de l'éruption de 1866 (*Compt. Rend. Ac. Sciences*, 1872, 75, 154-270).
- GORGEIX (H.). — Sur l'étude des fumerolles de Nisyros et de quelques uns des produits de l'éruption de 1873 (*Compt. Rend. Ac. Sciences*, 1874, 78, 1309).
- JANSEN (J.). — Sur la composition des gaz émis par le volcan du Santorin. Echange d'une lettre de Janssen à Sainte-Claire Deville (*Compt. Rend. Ac. Sc.* 1867, 64, 1303).
- LACROIX (A.). — Les cristaux de sylvite des blocs rejetés par la récente éruption du Vésuve (*Compt. rend. Ac. Sc.* 1906, 142, 1249).
- LACROIX (A.). — Sur une espèce minérale nouvelle de fumerolles à haute température de la récente éruption du Vésuve (*Compt. Rend. Ac. Sc.*, 1907, 144, 1397).
- LACROIX (A.). — L'éruption du volcan de Quezdltepeque et tremblement de terre destructeur de San Salvador juin-juillet 1917 (*Compt. rend. Ac. Sc.* 1917, 165, 1077).

- récente éruption du Vésuve et en particulier sur les minéraux arsenifères et plombifères (*Compt. Rend. Ac. Sc.* 1906, 143, 727).
- LE VERRIER (M.). — Note sur les formations du Forez et du Roannais (*Bulletin des Services de la Carte géologique de la France et des topographies souterraines*, 1891, 187-254).
- MOISSAN (H.). — Sur la présence de l'argon de l'oxyde de carbone et des carbures d'hydrogène dans les gaz des fumerolles du Mont Pelé à la Martinique (*C. R. Ac. Sc.*, 135, 1085).
- MOISSAN (H.). — Sur la volatilisation de la silice et de la zircone et sur la réduction de ces composés par le charbon (*Compt. Rend.* 1893, 116, 1922).
- SAINTE-CLAIRE-DEVILLE (C.). et LEBLANC (F.). — Remarques de M. Ch. Ste-Claire-Deville. Etude présentée à l'Académie sur le système éruptif des îles éoliennes et Lipari (*Compt. Rend. Ac. Sc.*, 61, 1965, 567).
- SCHUTZENBERGER (P.). — Observation sur la volatilisation de la communication de M. Moissau (*Compt. Rend. Ac. Sc.* 1893, 116, 1230).
- VELAIN (C.). — Analyse des dégagements gazeux de l'île St-Paul (*Compt. Rend. Ac. Sc.* 1875, 81, 332).
- ZAMBONINI (F.). — Sur la présence de la galène parmi les minéraux produits par les fumerolles de la dernière éruption du Vésuve (*C. R. Ac. Sc.*, 1906, 143, 921).

CHAPITRE PREMIER

ETUDE DES ELEMENTS DES EAUX MINERALES D'ORIGINE PROFONDE

Parmi les éléments dissous dans les eaux minérales, en est un certain nombre qui résultent probablement d'une manifestation volcanique atténuée. On a même assigné à l'eau, dans certains cas, une origine semblable. Pour nous renseigner sur de tels phénomènes, nous avons à notre disposition deux grands moyens : nous pouvons d'une part, étudier les gaz et les vapeurs dégagés pendant ou après une manifestation volcanique, nous pouvons, d'autre part, étudier les gaz et les vapeurs qui se dégagent lorsqu'on chauffe les roches à une température élevée voisine de celle qu'elles peuvent atteindre dans la profondeur d'une faille et d'un cratère. Pour rédiger ce chapitre, nous nous aiderons du beau livre de CLARKE : *The Data of Geochemistry*.

I. Les gaz d'origine volcanique

I. — *Les gaz d'origine volcanique*. Nous allons exposer dans l'ordre chronologique les différentes analyses qui furent faites au niveau des cratères ou à proximité de

